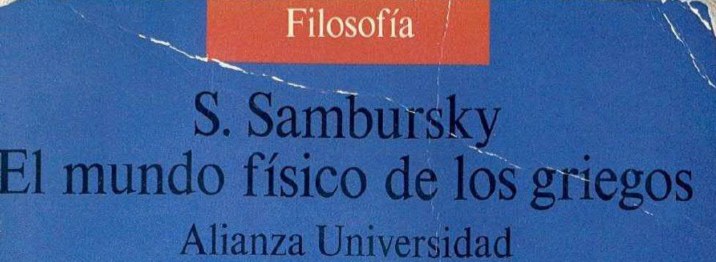


Filosofía

S. Sambursky

El mundo físico de los griegos

Alianza Universidad

EN su estudio clásico del pensamiento científico de los griegos, S. SAMBURSKY presenta las ideas relativas a lo que andando el tiempo se convertiría en el campo de la física. Especial relevancia para ello tienen las especulaciones cosmológicas de los primeros filósofos jonios, así como la formulación de los modelos discontinuistas de la materia, debidos a los atomistas, junto con las especulaciones continuistas de los estoicos. EL MUNDO FISICO DE LOS GRIEGOS se ocupa de estas cuestiones desde los pensadores presocráticos hasta las cumbres clásicas de Platón y Aristóteles. Su otra obra, *El mundo físico a finales de la Antigüedad,* continúa el examen del desarrollo de las ideas platónicas y aristotélicas en la época menos conocida de los últimos siglos de la Antigüedad y los primeros de nuestra era. El éxito de los estudios de Sambursky estriba en haber seleccionado las áreas temáticas más interesantes para la visión moderna del mundo físico, sin incurrir por ello en anacronismos o simplificaciones retrospectivas, haciendo además gala de una erudición clásica y un conocimiento de primer orden de las fuentes griegas. Renunciando a diseñar las conexiones más amplias de la ciencia con otras áreas y motivos culturales, las obras de Sambursky constituyen la óptima vía para acceder a la comprensión de la visión de la naturaleza de los griegos.

Alianza Editorial

ISBN 84-206-2630-9

El mundo físico de los griegos

Título original: *The Physical World of the Greeks*
Esta obra ha sido publicada por primera vez en 1956 y reeditada en tapa blanda en 1987 por Routledge & Kegan Paul Ltd.

Calle Milán, 38, 28043 Madrid; teléf. 200 00 45
ISBN: 84-206-2630-9
Depósito legal: M. 13.442-1990
Compuesto en Fernández Ciudad, S. L.
Impreso en Lavel, Los Llanos, nave 6. Humanes (Madrid)
Printed in Spain

INDICE

AGRADECIMIENTOS

En esta obra se han usado las traducciones inglesas disponibles de varias de las fuentes citadas. Las más importantes han sido tomadas de:

Ancilla to the Pre-Socratic Philosophers, traducción inglesa de K. Freeman (Blackwell).

Philebus, traducción inglesa de B. Jowett; *Republic*, traducción inglesa de F. M. Cornford; *Epinomis*, traducción inglesa de J. Harward (Oxford University Press).

The Works of Aristotle translated into English, editadas por W. D. Ross (Oxford University Press).

Aristotle, On the Heavens, traducción inglesa de W. K. C. Guthrie (Loeb Classical Library).

Greek Astronomy, traducciones inglesas de Sir Thomas L. Heath (Dent & Sons).

Lucretius, The Nature of the Universe, traducción inglesa de R. E. Latham (Penguin Books).

PREFACIO

Este libro es —al margen de algunos cambios de poca importancia— una traducción de la edición hebrea que fue publicada en 1954 por el Bialik Institute de Jerusalén.

No es una historia de la ciencia en la antigua Grecia, pues como físico estoy especialmente interesado en el modo en que los griegos vieron e interpretaron el mundo físico que les rodeaba. Los textos que he seleccionado y traducido en el curso de mis estudios, han ido constituyendo el marco en que estos capítulos encajan a modo de comentario o nota al margen.

Para el científico de nuestros días, la ciencia griega tal como se revela en estas fuentes presenta un panorama fascinante: por un lado, hay una sorprendente semejanza entre sus modos de pensamiento y los nuestros en todo lo concerniente a asociaciones e inferencias científicas, a la construcción de analogías y modelos, y al análisis del trasfondo epistemológico; por otro, mientras que nosotros intentamos transformar el mundo en una entidad matemática abstracta, que trasponiendo los límites del universo inorgánico se infiltra en la biología y en el reino de lo humano, los griegos vieron el cosmos como un organismo vivo, como una proyección del hombre sobre la inmensidad del mundo exterior.

Es básicamente por esa razón por lo que fueron incapaces de situarse en la posición arquimediana —fuera del cosmos— y con-

templar a éste como un objeto de análisis. Dicho análisis (o disección de la naturaleza —como Bacon lo llamaba—), necesariamente debe proceder mediante métodos «innaturales», como la experimentación sistemática o la matematización de los conceptos físicos. Así, los griegos, aunque dieran origen al enfoque científico y sentaran, por tanto, los cimientos de nuestro cosmos, fueron incapaces de realizar en un período de un millar de años el rápido progreso que se produciría en unas pocas décadas del siglo diecisiete. A partir de ese momento se desarrollaría una imagen del cosmos que ha de contemplarse contra el trasfondo de una civilización basada en la interrelación de ciencia y tecnología, mientras que el cosmos de los griegos emergió de un mundo cuya curiosidad científica se mantuvo al margen de cualquier deseo de conquista de la naturaleza.

S. S.

INTRODUCCION A LA SEGUNDA EDICION

Más de treinta años después de la publicación en 1956 de *The Physical World of the Greeks (El mundo físico de los griegos)*, esta segunda edición aparece sin apenas cambios, al margen de la corrección de algunas erratas de impresión que pude hallar. No pienso que la reimpresión de este libro tal y como está, necesite de alteraciones substanciales. Hoy, sin embargo, lo habría escrito con algunos cambios de énfasis o en el juicio emitido acerca de los méritos de este o aquel filósofo. Hay, igualmente, un número de problemas que no han sido discutidos en la extensión que merecían, dado que este libro se ha limitado esencialmente a los períodos clásico y helenístico antiguos.

En estos años he podido darme cuenta de que la ciencia griega continuó viva y se desarrolló también en la Baja Antigüedad; retrospectivamente diría que este libro es el primer volumen de una trilogía continuada con *Physics of the Estoics* (Londres, 1959) y *The Physical World of Late Antiquity* (Londres, 1962), ambos publicados por Routledge & Kegan Paul Ltd. Los aspectos de la ciencia griega que despertaron mi entusiasmo hace un tercio de siglo, conservan todavía hoy su entera validez. Aquí resumiré brevemente ciertos rasgos fundamentales y compararé los logros de los griegos con los de la ciencia moderna.

En primer lugar señalaré el maravilloso talento griego para la construcción de teorías científicas por medio de una diáfana deducción y una especulación pertinente y fructífera. Los dos ejemplos clásicos son, por supuesto, el atomismo de Leucipo a Lucrecio y la teoría del continuo. Ninguno de ellos se limitó a la explicación de la materia; su mira era más amplia ya que dieron expresión a dos aproximaciones filosóficas a la realidad física opuestas. Mientras la idea de los átomos arremolinándose en el vacío condujo finalmente a concebir desviaciones inesperadas e incausadas en sus cursos que formarían la base física del concepto de libre albedrío, la teoría del continuo fue asociada con un determinismo estricto, con el Hado que en las ulteriores etapas del desarrollo religioso pasaría a ser identificado con la Providencia.

Otra sorprendente característica de la ciencia griega es la escasez de experimentación sistemática y su limitación —casi exclusiva— a la observación como base de sus teorías. Si se quiere explorar el modo en que la Naturaleza funciona, debe hacerse con la menor interferencia posible, mientras que la esencia de un experimento es la creación de situaciones artificiales o no naturales —condiciones contrarias al ser mismo de la Naturaleza. El aislamiento de un fenómeno (la columna vertebral de cualquier experimento moderno), cualquier intento de separarlo del complejo de los fenómenos a los que está entrelazado, era completamente ajeno al espíritu del científico griego, como también lo era la repetición de un evento natural variando las circunstancias concomitantes. La Naturaleza, como el hombre, es una unidad indivisible que no puede ser seccionada sin distorsionarla. Por ejemplo Aristóteles, que desarrolló sistemáticamente el concepto de movimiento en todos sus aspectos, no tomó en consideración la influencia de la fricción o de la resistencia del medio sobre el móvil; al contrario, esos factores formaban —para él— un todo con el fenómeno del movimiento y su fórmula para el «movimiento violento» conduciría a una errónea proporcionalidad entre fuerza y velocidad. Aunque el resultado correcto habría de esperar a Galileo, otros defectos y errores de la física griega clásica fueron ya criticados y parcialmente corregidos en la Baja Antigüedad, por ejemplo por Filopón.

También algunas de las clasificaciones del movimiento de Aristóteles, como la caracterización del movimiento de descenso de un cuerpo bajo la influencia de su peso como una tendencia hacia su

«lugar natural» en la tierra, pueden explicarse por la concepción griega de la unidad de Hombre y Naturaleza; la Naturaleza, como el Hombre, tiende hacia un fin y, generalmente, la teleología desempeñó un importante papel en la explicación de muchos fenómenos físicos.

Entre los logros más destacados de Aristóteles se cuenta su minucioso análisis de los fundamentos del espacio y el tiempo, y entre ellos se incluye el claro reconocimiento de la unidireccionalidad del curso del tiempo —una seria anticipación del concepto de entropía y uno de los capítulos destacados del pensamiento griego antiguo que fue ampliamente elaborado por algunos de sus comentaristas neoplatónicos.

Es digno de señalar el que los griegos pusieran el acento de su investigación en la comprensión de cómo suceden las cosas, y no sobre la aplicación de los resultados a la predicción de eventos. Su concepción de la realidad estaba marcada por una aguda dicotomía entre cielo y tierra. En el cielo —con sus movimientos periódicos— todo puede ser predicho, mientras que la región sublunar está dominada por incertidumbres —de las que la más notable es el destino humano.

La historia de la astronomía griega, del período presocrático a Hiparco y Ptolomeo, es otra impresionante ilustración de su capacidad para construir teorías omnicomprensivas, modelos que «salven los fenómenos», dentro del marco de una cierta idea preconcebida. De hecho, los tediosos esfuerzos que perduraron durante centurias por explicar geométricamente —mediante ingeniosas combinaciones de círculos excéntricos y epiciclos— el comportamiento del sistema planetario recurriendo a la hipótesis geocéntrica, confirman las proféticas palabras de Platón en el *Timeo* con las que se apuntaba a una lucha sin fin entre la mente humana (la «Razón»), intentando descubrir orden y forma en la realidad física, y la fuerza bruta de dicha realidad (la «Necesidad»). Platón, en su formulación del producto de tal lucha, llegó a afirmar que, en el mejor de los casos, el resultado puede ser una mera victoria parcial de la Razón. Sólo «la mayor parte de las cosas que suceden» puede ser explicada satisfactoriamente; en otras palabras, siempre quedará un residuo inexplicable. Estas palabras de Platón fueron elaboradas y ampliadas por Proclo en el siglo quinto. Los movimientos planetarios —decía— simbolizan la esencia de la Naturaleza que combina regularidad y

contingencia, ley y arbitrariedad. Hegel —un gran admirador de la dialéctica de Proclo— formuló la conclusión de éste como sigue: «La Naturaleza es la contradicción irresuelta».

A la unidad de Hombre y Naturaleza, debemos añadir la unidad —o más bien la combinación— de pensamiento racional y místico exhibida de un modo tan neto por la Escuela pitagórica que produjo el primer eslabón en la larga cadena de la matemática griega. La matemática, la ciencia racional *par excellence,* estuvo basada originariamente en una creencia mística, casi religiosa, en la existencia de un orden cósmico, de una armonía en el universo que se muestra, por ejemplo, en el predominio de proporciones simples en ciertos hechos o datos fundamentales. La Música puede ayudar espiritualmente al hombre en su reconocimiento de tal armonía celeste, de esa «armonía de las esferas». Como ya he mencionado antes, los griegos prefirieron el conocimiento por sí mismo, la investigación pura, a la aplicada; esforzarse por conocer es aspirar al Bien como meta final. Como sus escritos reflejan, lo más probable es que hubiera alguna relación entre esta actitud y el descuido de la tecnología. ¿Ese descuido fue el resultado de un miedo instintivo a las consecuencias negativas de los logros tecnológicos? Lo que ciertamente muestra es el escaso valor que concedieron a ese tipo de realizaciones y yo voy a limitarme a un caso llamativo. Arquímedes, el más grande de los científicos de la antigüedad, destacó por sus logros teóricos así como por algunos técnicos y aplicados de suma importancia; un amplio número de sus tratados de matemáticas, mecánica e hidrología han sido conservados; sin embargo, no cabe duda de que varias de sus invenciones técnicas —especialmente sus investigaciones en técnicas militares— nunca fueron escritas y sólo han sobrevivido en el folklore o en la tradición oral.

A fin de poner de relieve los rasgos más característicos de la ciencia griega, es útil compararla con la ciencia moderna, es decir, con la ciencia desde la época de Francis Bacon, cuyos dos conocidos eslóganes «ciencia es la disección de la naturaleza» y «conocimiento es poder» —a saber, el poder del hombre sobre la naturaleza—, se han convertido en el programa de la investigación científica desde el siglo diecisiete hasta nuestros días. La agresiva actitud del hombre hacia la naturaleza, la ruptura de la unidad de Hombre y Naturaleza —la piedra angular de la sensibilidad cósmica griega—, iniciaron el entrelazado de ciencia y tecnología. La ciencia al servicio de la

tecnología y la tecnología al servicio de la ciencia condujeron a un ritmo de progreso, en ambos campos, jamás soñado, y a una elevación de los niveles de vida y de confort humanos. La tecnología ha recorrido un largo trecho en la reducción de la enfermedad y en la mejora del bienestar público, pero al mismo tiempo ha aumentado las atrocidades de la guerra y ha desarrollado un arte viciado de terror internacional. Es difícil decidir si el balance final de las consecuencias benéficas y perniciosas de esa fusión de ciencia y tecnología es positivo o negativo; pero una cosa es obvia: el desarrollo de la ciencia física en los últimos cuarenta o cincuenta años ha justificado algunas de las ideas y actitudes básicas de la ciencia griega. Tras el breve interludio positivista del siglo diecinueve, que pretendía reducir la ciencia a «observables» —una tendencia exitosamente criticada por grandes físicos como Plank y Pauli—, la astrofísica y la cosmología por un lado, y la física de partículas elementales, por otro, han dado origen a una más amplia concepción de la realidad, al descubrimiento de un universo maravilloso más allá del alcance de nuestros sentidos, que nos han conducido de nuevo a la primacía de la especulación fructífera, la más admirable característica de la ciencia griega antigua.

S. Sambursky

Jerusalén, septiembre de 1986.

NOTA

Los números que figuran en el texto entre corchetes hacen referencia a la lista de fuentes citadas que aparece al final del libro.

Capítulo I

EL ENFOQUE CIENTIFICO

«Sabiduría y conocimiento están en ti.»
2 Crón. I. 12

El estudioso contemporáneo de la ciencia griega antigua queda inevitablemente sorprendido ante la afinidad histórica entre esa ciencia y la nuestra, no menos que ante la diferencia entre ambas. La ciencia moderna —en especial la ciencia del mundo físico— se retrotrae al siglo diecisiete y su origen es normalmente asociado con los nombres de Galileo y Newton. A pesar de las muchas transformaciones a que se ha visto sometida durante estos últimos trescientos cincuenta años, y a las que ha de ser sometida con toda probabilidad en el futuro, el carácter de la ciencia moderna puede ser definido de modo preciso y sin ambigüedad. En lo tocante al método, por una interacción de inducción y deducción, mientras que en su propósito se da una conjunción de comprensión y conquista de la natualeza.

Es en la física donde esta combinación se halla de manera más llamativa, donde experimentación sistemática y formulación matemática contribuyen mano a mano al avance de la ciencia. Así como el experimento científico sistemático y preciso es en nuestros días inconcebible sin cálculos matemáticos teóricos, así también la matematización de la ciencia aumenta con el incremento de nuestro conocimiento experimental de la naturaleza. Los instrumentos utilizados han ido siendo cada vez más complicados; los métodos de realización del experimento son más y más precisos y la descripción mate-

mática de una teoría científica y la aplicación de principios matemáticos a los fenómenos experimentales, asumen cada vez formas más abstractas. Con respecto a todo ello, asistimos a un constante perfeccionamiento de los procesos recíprocos de inducción y deducción. La segunda síntesis característica de la ciencia moderna encuentra expresión en la interdependencia de la ciencia pura y la aplicada, de la ciencia por sí misma y la tecnología. No hay rama de la ciencia o teoría científica que comenzando por una investigación puramente teórica de la naturaleza, no contribuya eventualmente al control de ésta a través de la mejora de la tecnología. Recíprocamente, cada mejora arduamente conseguida en la esfera técnica, infunde un nuevo vigor a la ciencia pura y enriquece sus bases teóricas. El intervalo entre el descubrimiento de un nuevo principio y su aplicación práctica es cada vez más corto, mientras que el número de problemas que cada invención técnica plantea crece, igualmente, de un modo constante.

La ciencia moderna no partió de la nada; de hecho, su primer paso fue deshacerse del legado de la antigua Grecia. Galileo cuestionó la dinámica de Aristóteles del mismo modo que Copérnico, cien años antes, había construido su teoría heliocéntrica desafiando a la astronomía de Ptolomeo. Para ser exactos debemos hacer notar, sin embargo, que la revuelta de los pioneros de la ciencia moderna no iba dirigida contra el legado de la ciencia griega en cuanto tal, sino contra la petrificación de sus principios —en especial de la doctrina de Aristóteles— con que el escolasticismo medieval les había obsequiado. Fue una revuelta contra la ciega aceptación de esa estéril pedantería libresca que había divorciado completamente la ciencia de la naturaleza del mundo de los fenómenos; no era tanto un ataque a opiniones científicas concretas, cuanto una demanda en favor de un enfoque científico nuevo —o quizá debiéramos llamarlo un renacimiento científico, en vista de que la aproximación original de la ciencia griega antigua a los problemas naturales era instructiva y estaba viva, muy al contrario que el exangüe escolasticismo. Ese es el punto de contacto entre la ciencia griega y el moderno renacimiento científico, y es desde ese punto de partida desde el que podríamos considerarnos los herederos de la antigua Grecia.

Mas ¿en qué sentido puede haber alguna conexión entre dos períodos tan diferentes entre sí en lo tocante a método y objetivo?

Con muy pocas excepciones, los griegos antiguos no hicieron ningún intento de experimentación sistemática a lo largo de ocho siglos. Este hecho fundamental y decisivo —reflejando, como lo hace, ciertas condiciones y una cierta mentalidad— requerirá de nuestra atención en el último capítulo. Su consecuencia fue que la inducción se vio limitada a la observación sistemática y a la colección de material experimental tal como se ofrecía en el estudio de los fenómenos naturales. Tal inducción era, naturalmente, primitiva, en términos de la concepción moderna de la ciencia; mas tampoco era mejor la deducción de los griegos si se tiene en cuenta que carecía de lo que Kant consideró la característica *par excellence* de cualquier ciencia verdadera: la matematización de sus conceptos fundamentales y la deducción de hechos a partir de leyes expresadas en términos de fórmulas matemáticas. Entre los griegos, la aplicación de las matemáticas a los problemas científicas se restringía a la descripción de ciertos fenómenos, en su mayoría astronómicos, junto a unos pocos del campo de la estática o la óptica. Encontramos así algunas pruebas deductivas y unos cuantos cálculos de datos cosmológicos como la circunferencia de la Tierra o la distancia de algunos cuerpos celestes a la Tierra. También en su objetivo la ciencia antigua es muy diferente de la nuestra; no aspira a la conquista y control de la naturaleza, sino que viene motivada por una curiosidad puramente intelectual. Por esta razón la tecnología no encuentra un lugar en ella y adolece de una carencia del tipo de síntesis de conocimiento puro y aplicación práctica que da fuerza a la ciencia moderna.

Pese a todo ello, hay una conexión científica entre los dos períodos y realmente podríamos ir tan lejos como para afirmar que las raíces de la ciencia moderna han de encontrarse en el Mundo Antiguo, ya que los principios del enfoque científico —que son tan válidos como para seguir siéndolo en nuestros días— fueron descubiertos en la antigua Grecia. Debemos recordar el precedente de la revolución científica del siglo VI a.C., para reconocer la importancia de ese innegable hecho histórico.

Al igual que cualquier otra ciencia, la griega no surgió en el vacío. De tiempos más antiguos aún, y de varias civilizaciones, heredó material que en parte sería desarrollado y en parte no: los mitos precientíficos, las cosmogonías de Grecia y los tesoros acumulados en dos mil años de ciencia babilónica y egipcia.

Los egipcios y babilonios consiguieron sus principales éxitos en astronomía y matemáticas, justo los campos en que también los griegos hicieron, a continuación, sus mayores avances. En el curso de dos mil años, la observación astronómica dio lugar a un conocimiento empírico de los movimientos estelares con el que los egipcios y babilonios fueron capaces de determinar aproximadamente los ciclos de los eclipses solares y lunares, y de confeccionar un calendario que sería después adoptado por los astrónomos griegos, con correcciones basadas en sus propias observaciones. No menos importantes fueron los logros en álgebra y geometría. El elevado nivel alacanzado por la tecnología egipcia en metalurgia, minería y construcción, proporciona evidencia adicional de la riqueza de su conocimiento científico. Sin un amplio conocimiento de mecánica y estática, y sin una desarrollada técnica en ingeniería, habría sido imposible construir las pirámides, transportar los enormes obeliscos desde las canteras hasta los lugares en que se erigieron, o llevar a cabo el trabajo ulterior de alzarlos. Cada nuevo descubrimiento en arqueología egipcia y babilónica aumenta nuestra admiración hacia esos logros científicos y técnicos que alcanzaron su zénit cientos de años antes del nacimiento de la ciencia griega. Pero de todos ellos no surge una imagen uniforme, ni los detalles separados coagulan para formar un cuerpo único de pensamiento científico fundamentado en una doctrina filosófica omnicomprensiva, sino que para ello hubo de aguardarse a aquel enfoque científico del estudio de la naturaleza que sería creación de los griegos en el siglo VI.

Tal enfoque adquirió la forma de un intento por racionalizar los fenómenos y explicarlos dentro del marco de hipótesis generales. El objetivo que se pretendía era dar validez general a la experiencia obtenida de la contemplación del mundo como una sola unidad ordenada, un cosmos cuyas leyes pueden ser descubiertas y expresadas en términos científicos. Así pues, el que esos primeros pasos en el pensamiento científico sistemático fueran dados en el seno de la filosofía, o que las ciencias naturales y la filosofía continuaran enlazadas a lo largo de la mayor parte de la historia de la antigua Grecia, no fue mero azar. Una de las principales empresas de la antigua filosofía griega fue dar una interpretación racional a las ocurrencias naturales que habían sido explicadas anteriormente mediante las antiguas mitologías. El logro de la independencia, obtenido por la ciencia griega a través de la lucha del logos contra el mito es, en varios aspectos,

similar al nacimiento de la ciencia moderna del ataque contra el petrificado escolasticismo medieval. Con el estudio de una naturaleza liberada del control del gusto mitológico, la vía para el desarrollo de la ciencia como un sistema intelectual quedaba abierta. Del mismo modo, la liberación de la ciencia de la dominación del dogmatismo filosófico de la Edad Media allanó el camino para el surgimiento de la ciencia moderna como una provincia autónoma de la cultura humana.

Para mostrar que los períodos moderno y antiguo son semejantes en su aproximación científica a la comprensión de la naturaleza, debemos recurrir a la literatura científica y filosófica antigua y comparar sus métodos con los nuestros. Mas existen dos peligros: en primer lugar, debemos recordar que una gran parte de la ciencia griega ha llegado hasta nosotros sólo de segunda mano; la mayor parte del período antiguo —los siglos VI y V a.C.— nos es conocido principalmente por las versiones de Aristóteles, los comentaristas posteriores y los compiladores de las primeras centurias de nuestra era, como también sucede con las importantes enseñanzas científicas del período post-aristotélico. Es probable que en el curso de dicha transmisión, conceptos posteriores fueran proyectados sobre las teorías de una época anterior. E incluso un peligro mayor reside en la proyección por parte del autor moderno de nuestras ideas sobre las de la antigüedad griega. En tal caso, el resultado puede ser incluso más distorsionador debido a la diferencia esencial de visión, por lo cual nos ocuparemos de ello en un capítulo posterior. Pese a todo, no hay una buena razón por la que la cautela deba conducirnos al absurdo de renunciar a cualquier comparación; la misma naturaleza y los mismos datos empíricos que proporcionaron el fundamento básico al pensamiento científico en los tiempos antiguos, nos sirven todavía hoy y, donde el objeto de investigación está claramente definido, éste necesariamente trazará pautas de comprensión definidas. Aunque el grado de éxito en la comprensión de la realidad es variable, la dirección tomada por la investigación es la misma. De ahí que un estudio de las semejanzas —aun mostrándonos los límites de la comparación— nos ayude a comprender las características especiales de la ciencia griega antigua.

De acuerdo con Aristóteles, el amanecer del razonamiento científico sistemático tuvo lugar a comienzos del siglo VI a.C. en Mileto,

en la costa occidental del Asia Menor. Tales, y después de él Anaximandro y Anaxímenes, fueron los primeros filósofos cuyas preguntas y respuestas manifestaron un enfoque verdaderamente científico, de acuerdo con nuestra definición de este término. Los tres se preguntaron por la sustancia física que subyace a todos los fenómenos, por la naturaleza de esa «materia primordial» de la que estaban hechas todas las manifestaciones físicas. Pero no todos ellos dieron la misma respuesta a esta cuestión. Tales y Anaxímenes señalaron una sustancia específica: el primero escogió el «agua» como substrato, mientras el segundo consideraba al «aire» materia primordial. Anaximandro, por el contrario, dijo que era imposible dar a dicho elemento un nombre. La cuestión es importante en sí misma, pero antes de considerarla, veamos de qué modo ha llegado hasta nosotros en nuestras fuentes.

Para la doctrina de los filósofos milesios nuestra autoridad es Aristóteles, quien expuso los rasgos de la teoría de Tales como sigue: «Pues bien, la mayoría de los filósofos primitivos creyó que los únicos principios de todas las cosas eran de índole material; pues aquello de lo que constan todos los entes y es el primer origen de su generación y el término de su corrupción, permaneciendo la sustancia pero cambiando en las afecciones es, según ellos, el elemento y el principio de los entes. Y por eso creen que ni se genera ni se destruye nada, pensando que tal naturaleza se conserva siempre..., pues dicen que siempre hay alguna naturaleza, ya sea una o más de una, de la cual se generan las demás cosas, conservándose ella. Pero, en cuanto al número y a la especie de tal principio, no todos dicen lo mismo, sino que Tales, el iniciador de tal filosofía, afirma que es el Agua» [1].

Aristóteles se pregunta por qué Tales escogió el agua, y la respuesta dada por él es que las principales razones fueron biológicas: todo alimento contiene agua y todo tipo de semilla es húmeda. Pero también considera que Tales pudo haber estado influido por la mitología, porque en la mitología griega el Océano es el padre de todas las cosas. Quizá aquellos que acentúan la razón física pudieran asimismo estar en lo cierto, ya que el agua es la única sustancia que el hombre ha conocido desde los tiempos más remotos en sus tres estados —como un sólido, un líquido y un vapor— y que, por tanto, visiblemente encarnaba «la sustancia que permanece pero cambiando en las afecciones».

Todas estas interpretaciones no son más que suposiciones necesariamente, pero no puede dudarse de un hecho fundamental y es que tenemos aquí, ante nosotros, una aplicación del principio científico por el que un máximo número de fenómenos debe ser explicado mediante un mínimo de hipótesis, o lo que puede ser considerado un criterio de simplicidad para una teoría, si ésta lograra asentar el mayor número posible de hechos, mediante el menor número posible de supuestos. Cada paso en esta dirección puede considerarse un progreso científico y el objetivo último, el ideal platónico de que toda ciencia derivase de una única raíz la suma total de sus datos. Aunque la ciencia moderna obviamente presenta demandas mucho más insistentes que las de sus antiguos predecesores en lo que respecta a la síntesis de inducción y deducción matemática, las dos son iguales, al menos en principio. Por ejemplo, si la física lograra derivar de una raíz común las fuerzas de gravitación y la electricidad, veríamos esa nueva simplificación de la imagen física del mundo como un gran éxito. Tal fue la sensación de los contemporáneos de Newton cuando éste demostró que su ley de gravitación incluía las tres leyes de Kepler. Una simplificación similar se alcanzó al probarse que las ondas de radio, los rayos de luz y los rayos X eran, todos ellos, radiación electromagnética que difería sólo en longitud de onda, y que tenían básicamente las mismas cualidades físicas.

Fue Tales quien concibió por primera vez el principio de explicación de una multiplicidad de fenómenos mediante un pequeño número de hipótesis para todas las variadas manifestaciones de la naturaleza. En virtud de su conjetura de que hay una sustancia «de la cual se generan las demás cosas, conservándose ella», se convirtió en el padre de todas las teorías de la materia que le siguieron, desde la teoría de Empédocles de los cuatro elementos y la teoría atómica de Leucipo, Demócrito y Epicuro, pasando por la alquimia de la Edad Media, hasta la química y la física atómica de nuestros días. Tales y sus seguidores tuvieron miras tan amplias como para llegar a postular una única sustancia incambiable que es el substrato de los fenómenos y el desarrollo de la ciencia moderna indica que estaban en lo cierto cuando escogieron su audaz conjetura.

Una segunda concepción que la escuela milesia legó a las generaciones futuras —hasta nuestra época— consiste en su unión de la idea de una materia primordial con la ley de la conservación de

la materia. Puesto que una única sustancia subyace a todos los cambios de los fenómenos físicos, desarrollo y deterioro no deben ser sino meras ilusiones, y la creación de la nada, o la reducción a nada de todo cuanto existe, imposibles.

Si en un cierto estadio del desarrollo de una teoría científica nos hemos visto enfrentados con la necesidad de aceptar una hipótesis que incorporaba la idea de una *creatio ex nihilo,* hemos ampliado el concepto de sustancia de tal modo que se restaurasen las leyes de conservación; un ejemplo clásico de esto fue la inclusión del calor en el concepto de energía, paso que se dio cuando se mostró que la ley de conservación de la energía mecánica no se satisfacía en cualquier sistema. Otro caso bien conocido es el de la modificación de la ley de conservación de la materia para convertirla en la ley de la conservación de la energía, al probarse que la materia podía transformarse en radiación. Las leyes de conservación son ahora una parte esencial de la ciencia, hasta el punto de que sea difícilmente concebible que pudiésemos funcionar sin ellas, o que la ciencia adoptase un carácter tal que no permitiera la formulación de dicho tipo de leyes.

La posibilidad de esa formulación quedaba implicada por la premisa que la Escuela milesia consideró autoevidente: la naturaleza permite una explicación racional que reduce el número de variables y reemplaza algunas de ellas por cantidades constantes, independientes del tiempo o la forma peculiar de un proceso dado. No fue, pues, un mero accidente el que en la doctrina de Tales estuviesen ligadas la existencia de una materia primordial y su conservación.

Hemos hablado ya de las opiniones de Anaximandro: «Anaximandro... dijo que el primer principio y Elemento es lo No-Limitado. El fue el primero en introducir ese término para el primer principio. Dijo que ni el agua ni ninguna de las cosas sugeridas como Elementos eran el primer principio, sino que hay alguna otra sustancia no-limitada por la que todo —los cielos y los mundos que contienen— llega a ser. Necesariamente la fuente de la que todas las cosas derivan su existencia es también aquella a la que retornan con su destrucción, porque se hacen justicia, y mutuamente reparan su injusticia, conforme a la medida del tiempo» [5].

Anaximandro no consideraba adecuado dar un nombre a la materia primordial porque cualquier especificación necesariamente ha-

bría de privarle de la característica esencial que daba sentido a su concepción, a saber, su completa carencia de atributos. Las palabras de Anaximandro señalan cómo hemos de entender sus opiniones. El mostró que los cambios cíclicos de la naturaleza alumbran y destruyen ciertas cualidades opuestas; del mismo modo que cambian las estaciones del año, los opuestos fundamentales —calor y frío, húmedo y seco— se sustituyen unos a otros. Dichos opuestos no son abstractos, sino que están ligados a ciertos estados físicos. El predominio de uno constituye una «injusticia», pero el curso del tiempo, al dar al opuesto la oportunidad de ser predominante, hace justicia. Ninguno de los opuestos puede lograr un dominio absoluto ni aniquilar a los otros. En ese sentido, todos son limitados, es decir, finitos en el espacio y el tiempo, aunque todos son producto de una materia primordial ilimitada, que es el depósito de las mutaciones sin fin. A partir de esta observación de los cambios cíclicos, Anaximandro llegó a la siguiente conclusión: «Lo ilimitado comprende la causa total de la generación del mundo y de su corrupción. De él fueron separados los cielos y todos los innumerables mundos» [6].

La sustancia ilimitada no sólo es carencia de cualquiera de las cualidades específicas, sino que es además el substrato de todos los fenómenos físicos y de sus mutaciones. En el lenguaje de la física moderna diríamos que es el origen de todas las cantidades, bien sean masa y energía en cualquiera de sus formas, bien carga eléctrica o fuerza nuclear y gravitacional. O en palabras de uno de los comentaristas posteriores: «Encontró el origen de las cosas, no en el cambio de la materia, sino en la separación de los opuestos —a partir de lo ilimitado— mediante un movimiento sin fin» [5]. Los opuestos separados son las cualidades que pueden definirse físicamente y que al especificarse son, por tanto, limitadas. Por el contrario, lo ilimitado es la entidad última, inanalizable e indivisible y cualquier intento de darle un nombre concreto o una señal de identificación, lo traspone al mundo de los conceptos específicos.

El tercer filósofo milesio, Anaxímenes, parece desilusionante a primera vista; sin embargo, analizándole detenidamente nos encontramos con que da un paso adelante en otro de los rasgos del enfoque científico. «Anaxímenes de Mileto, hijo de Eurístrato, dice —como su compañero Anaximandro— que la materia primera es una e ilimitada, mas no indefinida, como éste, sino definida, y la llama aire; ésta difiere en su naturaleza sustancial por su rarefacción o

condensación. Al hacerse más sutil se convierte en fuego y en viento, si se densifica más a continuación, en nube; si se condensa más, se convierte en agua, luego en tierra, después en piedras, y el resto de los seres surgen de estas sustancias» [12]. En otras palabras, Anaxímenes regresó a la posición de Tales con respecto a la materia primordial. El también postuló una sustancia con una cualidad específica, aunque fuera ilimitada en cantidad, esto es, infinita. El aire de Anaxímenes, y de varios pensadores posteriores, es indistinguible del vapor, el viento o el aliento —y la transición del aliento al espíritu, es decir, al alma, es bien conocida. Este aspecto de la doctrina de Anaxímenes es importante para el ulterior desarrollo de la física griega, ya que la palabra griega «pneuma» significa aliento o aire o espíritu y en la física de los estoicos el término adquirió un significado técnico conectado sólo remotamente con su origen: básicamente fue utilizado por ellos para designar la cualidad del cosmos que une las partes en un todo singular orgánico a través de un estado de tensión que todo lo penetra. Este desarrollo semántico fue sin duda faciltado por las cualidades dinámicas del aire reveladas tanto en su elasticidad como en su movimiento en forma de viento. Mas también hay una conexión con el significado originario de aliento a través de la analogía del cosmos con una criatura que vive y respira. Desde que el hombre respira a través de sus fosas nasales, su cuerpo y cada una de sus partes forman un todo orgánico singular. De modo similar, el pneuma, el aliento del cosmos, mantiene la cohesión entre sus partes. El origen de la doctrina estoica se halla en las enseñanzas de Anaxímenes. Se conserva una frase en la que éste expresa su opinión con sus propias palabras: «Del mismo modo que nuestra alma —que es aire— nos mantiene unidos, así también el aliento y el aire envuelven a todo el universo» [13].

Una razón adicional para identificar al aire con la materia primordial es que actúa como un medio entre los opuestos. El aire adopta unas veces una forma fría; otras, caliente; en todos los eventos está de algún modo presente entre el fuego y el agua. Esto señala a la otra cara de la enseñanza de Anaxímenes que antes citábamos. El aire, y asimismo el vapor que es considerado aire, aparece bajo formas distintas: como aire caliente o aire frío, como viento que arrastra las nubes se vuelve más denso y se convierte en agua. Por ello es posible generalizar esa materia a todas sus manifestaciones —inclusive todas las variedades de sólidos—, pues son, simple-

mente, aire bajo diferentes formas. O en otras palabras, se abre una vía de explicación en términos físicos de cómo las diversas formas de la materia derivan de una primordial. Al decir «difiere en su naturaleza sustancial por rarefacción o condensación», Anaxímenes explicó la cualidad de los diversos tipos de materia por la cantidad de materia primordial: todo es aire en un grado de densidad variable. En un extremo de la escala de densidad se encuentra el fuego —que es simplemente aire muy rarificado—, mientras en el otro encontramos todos los distintos tipos de tierras, es decir, los sólidos; en el medio está el agua. Paralelamente a la escala de densidad hay una escala de temperaturas. Aparentemente Anaxímenes llegó a la identificación del aire con la materia primordial también a través del hecho de que el aire no sea visible en su estado «normal», y en mayor medida, porque su movimiento produce a veces transiciones de un estado a otro («viento-nubes-agua»). Por todas esas razones, ocupa un lugar intermedio entre lo caliente y lo frío. «En su forma el aire es como sigue: en tanto permanece en su proporción común, es invisible; se hace visible con el calor y el frío, en condensación y en movimiento. Siempre está en perpetuo movimiento, ya que no podrían cambiar cuantas cosas cambian, si no se moviese» [14].

El movimiento fue considerado por los filósofos milesios un hecho básico que no necesitaba explicación, algo en que la posterior escuela atomista les secundó. «Todo se crea por la condensación y rarefacción del aire, pero el movimiento existe desde la eternidad» [15]. Fue el movimiento lo que hizo aprehensible el principio de que la cualidad podía reducirse a cantidad y fue con ese principio con el que la Escuela milesia alcanzó su mayor éxito, ya que en esa breve sentencia está comprendida la verdadera esencia de la ciencia desde la época de Anaxímenes hasta el presente. Durante el período antiguo esta tendencia no llegó a desarrollarse completamente por las razones que ya hemos mencionado, pero la matematización de la ciencia moderna ha seguido el camino hasta abstraer todas las cualidades del mundo físico y sus fenómenos, y reemplazarlos por cantidad, es decir, por el número y la medida. Aunque hay un largo trecho de la doctrina especulativa de Anaxímenes, a los extremadamente abstractos cálculos del físico y el matemático de hoy en día, metodológicamente son lo mismo. Aristóteles en su *Metafísica* definió clara e intencionadamente el método como sigue: «Y así como el matemático realiza su investigación en torno a los productos de

la abstracción (investiga, en efecto, eliminando previamente todas las cualidades sensibles, como el peso y la levedad, la dureza y su contrario, y también el calor y la frialdad y los demás contrapuestos sensibles, y sólo deja la cantidad y la continuidad, de unas cosas en una dimensión, de otras en dos y de otras en tres, y considera las afecciones de estas cosas en su calidad de cuántas y continuas, y no en ningún otro sentido, y de unas considera las posiciones recíprocas y lo que corresponde a éstas, de otras la conmensurabilidad o la inconmensurabilidad, de otras las relaciones proporcionales, y, sin embargo, decimos que hay una sola ciencia de todas estas cosas, la Geometría), del mismo modo sucede también en lo relativo al Ser» [169].

Las cuestiones que ocuparon a los filósofos de Mileto representan la esencia de los problemas constantemente recurrentes en la doctrina física de los pensadores subsecuentes. Al margen de la especulación sobre la naturaleza de la materia, la atención se centró en la cosmología, en cuestiones tales como la estructura del cosmos, la figura de la Tierra, la naturaleza de los cuerpos celestes o sus movimientos. La predicción de Tales del eclipse solar del 585 a.C., nos muestra que conocía las reglas empíricas mediante las cuales los pueblos del Oriente antiguo determinaban los ciclos de eclipses. Herodoto nos dice: «En el sexto año de la guerra [entre Lydia y Media] ocurrió que, habiendo comenzado la batalla, el día se convirtió repentinamente en noche. Ese eclipse había sido predicho a los jonios por Tales de Mileto, quien lo fijó para el año en que de hecho ocurrió» [2]. La mayor parte de las conclusiones que Tales dedujo de las observaciones astronómicas habían sido ya conocidas por babilonios y egipcios; su importancia real reside en haber transmitido a Grecia esa tradición de observación y cálculo astronómico.

La figura esférica de la Tierra siguió siendo desconocida para la Escuela milesia. Tales y Anaxímenes mantuvieron que la Tierra era plana y descansaba sobre la materia primordial: «Otros dicen que descansa sobre el agua. Esta es la explicación más antigua que ha llegado hasta nosotros y es atribuida a Tales de Mileto. Según él, la Tierra está en reposo porque puede flotar como la madera y sustancias similares; ninguna de esas sustancias, en efecto, reposa de forma natural en la superficie del aire, pero sí lo hacen en la superficie del agua» [3]. Con ello se proporcionaba una explicación «natural» a los terremotos: «Tales dijo que la Tierra es arrastrada por

el agua y se mueve como un barco y que cuando se dice que «tiembla», se está en realidad meciendo debido al movimiento del agua» [4].

Anaxímenes mantuvo que la Tierra plana era sostenida por el aire. Posiblemente llegó a esa conclusión a partir de la observación de que la resistencia del aire a los cuerpos que caen aumenta apreciablemente con el tamaño de su superficie. En oposición a tales opiniones, Anaximandro fue el primero en mantener que la Tierra está suspendida en el espacio, y con respecto a su figura dijo: «La Tierra tiene la figura de un cilindro, cuya altura es un tercio de su anchura» [6]. Es decir, suponía que nosotros estamos en la cara superior del cilindro, mientras el cilindro mismo descansaba en el centro del cosmos: «Algunos atribuyen a su "indiferencia" [de la Tierra] * la causa de que permanezca en reposo; por ejemplo, entre los antiguos filósofos, Anaximandro. Estos mantienen que una cosa que está situada en el centro y mantiene relaciones idénticas con todos los extremos, no está más inclinada a moverse en una dirección antes que en otra —sea hacia arriba, hacia abajo o hacia los lados—; y puesto que le es imposible llevar a cabo un movimiento en direcciones opuestas al mismo tiempo, necesariamente ha de permanecer en reposo» [7].

Esas afirmaciones han llegado hasta nosotros a través de Aristóteles, quien las criticaba duramente comparándolas al argumento por el cual un hombre que estuviese rodeado por comida y bebida situadas a iguales distancias de él, moriría de hambre y sed. Aristóteles encausó la teoría de Anaximandro porque entraba en conflicto con su propia doctrina del movimiento de los cuerpos hacia su lugar natural, según la cual el fuego, por ejemplo, que asciende hacia lo alto, no permanece en el centro, sino que se aleja de éste. Hoy rechazamos cualquier prueba *a priori* de una teoría física construida sobre consideraciones tales como la simetría, y carente de un análisis previo y completo de los datos empíricos. Sin embargo, no podemos desechar completamente el principio que subyace a la teoría de Anaximandro, como hizo Aristóteles, ya que, de hecho, dicho principio ha sido de utilidad en varias ramas de las ciencias exactas, tanto en la actualidad como antiguamente. En la ciencia moderna aparece como el principio de usencia de razón suficiente; a veces, cuando no podemos encontrar una razón adecuada cualquiera para que exista una divergencia con respecto a una situación dada, es precisamente

esa ausencia la que aparece como razón suficiente para la estabilidad de dicha situación. En estática ese principio ha servido como prueba del equilibrio de un sistema perfectamente simétrico, pues no hay razón para que si una balanza es simétrica tanto con respecto a sus dimensiones (longitud de los brazos), como a las fuerzas y la dirección en que actúan, pierda su estado de equilibrio. Laplace aplicaba el mismo supuesto al estudio de las posibilidades en el lanzamiento de un dado simétrico. En su *Teoría analítica de las probabilidades,* explícitamente afirmaba que no hay razón para asumir que un caso sea más probable que otro y, por tanto, cada uno de los seis casos debían ser considerados como poseedores del mismo grado de probabilidad. Ahí también —como en el caso de la balanza— encontramos el principio de ausencia de razón suficiente aplicado a un caso de simetría en que es operativa la «condición de indiferencia» de Anaximandro. En principio nada separa el método de Anaximandro del de Laplace, sin embargo, hoy somos más cautos en el uso que hacemos de este principio y vemos la ausencia aparente de una causa suficiente como un signo de que nuestro conocimiento es incompleto; en el caso del dado, presumimos que el centro de gravedad coincide con el centro geométrico. El conocimiento astronómico de Anaximandro era tan inadecuado que deberíamos decir que él aplicó un principio correcto a un objeto inapropiado y, de hecho, hoy empleamos el principio de ausencia de razón suficiente sólo bajo aquellas circunstancias en que es idéntico a su opuesto, el principio de razón suficiente. Comoquiera que nuestro conocimiento es imperfecto, su uso resulta extremadamente dudoso.

Es en la cosmología de Anaximandro donde se utiliza por primera vez el modelo científico como un medio descriptivo o como un método de explicación de los fenómenos, y con el que se marca el comienzo de un proceso que ha culminado en el globo y planetario modernos. Anaximandro fue el primero en «concebir la idea de dibujar la tierra habitada sobre una tablilla. Tras él, Hecateo de Mileto, viajero incansable, perfeccionó hasta tal punto la carta, que llegó a ser motivo de admiración» [8]. De acuerdo con otra fuente «él fue el primero en describir la circunferencia de la Tierra y las aguas, y también en construir una esfera celeste» [9].

Aquí encontramos el modelo científico en su acepción puramente descriptiva, la reducción a escala de las dimensiones cósmicas hasta un tamaño en que el todo y sus partes pueden ser adecuadamente

estudiados. Fue también Anaximandro quien usó el modelo mecánico como un medio para mostrar un fenómeno físico. Incluso hoy, cuando la absoluta precisión terminológica y la abstracción matemática gobiernan las ciencias naturales, parecería imposible a la ciencia prescindir del modelo como medio de dar forma concreta a las ideas y métodos. De vez en cuando, al buscar una imagen concreta de «cómo funcionan las cosas», tenemos que dejar de lado las abstracciones matemáticas y la precisión absoluta del lenguaje de los símbolos y recurrir a un modelo mecánico. Nos formamos una idea de la acción de las fuerzas elásticas con la ayuda de muelles o nos representamos la estructura de la molécula en forma de bolas juntas, dispuestas de un cierto modo en el espacio; explicamos la propagación del sonido o la radiación electromagnética, empleando el modelo de las ondas en el agua de un estanque y, en la actualidad, nos esforzamos por encontrar un modelo adecuado de lo que sucede en el núcleo del átomo. De acuerdo con las circunstancias de cada caso, consideramos el modelo o bien como una aproximación a la realidad, o una réplica exacta de ésta o, simplemente, una herramienta que sólo nos proporciona una idea elemental del mecanismo del fenómeno. En todos estos casos el modelo mecánico conlleva un principio de explicación científica, en concreto, el principio de analogía. En una analogía un fenómeno es explicado en términos del funcionamiento de otro con el que ya estamos familiarizados o que ya hemos utilizado. En la medida en que el objeto o el campo de investigación lo permiten, tales analogías posibilitan un avance, regla general que no se aplica solamente al uso de modelos concretos, sino que es válida también en el caso de la transferencia de símbolos o métodos de cálculo de un campo a otro, o en la acuñación por analogía de nuevos conceptos que reemplacen a los viejos, bien sea ampliando estos últimos, bien dotándoles de una aplicación más general.

La utilización por parte de Anaximandro de un modelo mecánico para ilustrar las dimensiones y movimientos de los cuerpos celestes supuso un enorme avance con respecto a las alegorías y leyendas mitológicas al uso en épocas anteriores. «Anaximandro dijo que el Sol es un círculo veintiocho veces mayor que la Tierra y que es como la rueda de un carro, con un aro hueco lleno de fuego. En un punto de su superficie el fuego emite un resplandor a través de una abertura semejante a la boquilla de un fuelle... Un eclipse de Sol es el resultado del cierre de la abertura por la que pasa el fue-

go» [10]. Esta descripción plantea la cuestión de por qué esa rueda no nos es visible y por qué sólo vemos la abertura que hay en ella. La respuesta la encontramos en otra afirmación procedente de la misma fuente: «De acuerdo con Anaximandro, las estrellas son aire comprimido en forma de ruedas llenas de fuego, que arrojan sus llamas a través de aberturas situadas en ciertos puntos» [11]. La rueda, por tanto, está hecha de aire comprimido y, puesto que el vapor de agua está incluido en el concepto de aire, será como la bruma o como una nube distante que no puede distinguirse del cielo. El movimiento del Sol a través del cielo será simplemente el desplazamiento de la abertura, debido al giro de la rueda. Ambos modelos, el de las ruedas girando y el del fuego apareciendo en la boca de la fragua, son ejemplos perfectos de analogía técnica que nos permiten formarnos una vaga idea de la tremenda revolución mental que tuvo lugar en Mileto en el siglo VI.

El uso de la analogía mecánica completa el cuadro del enfoque científico que diferenció a la Antigua Grecia de toda cultura anterior. Históricamente hablando, éste es el logro decisivo frente al cual apenas adquieren importancia detalles tales como las todavía muy primitivas teorías sobre las distancias relativas de las estrellas. «La más alta de todas es el Sol; a continuación viene la Luna y, por debajo de ella, las estrellas fijas y los planetas» [11] —se nos dice en nombre de Anaximandro. También podría decirse que, en su opinión, la relación entre esas distancias —es decir, entre los radios de las ruedas de las estrellas fijas y los planetas, la Luna y el Sol— estaba en la proporción de 9:18:27, múltiplos de 3, aparentemente tomados de las cosmologías más antiguas (ya hemos observado que el número 3 aparece también en la relación entre la anchura y la altura del cilindro terrestre).

Hasta ahora hemos examinado cuatro ejemplos dignos de atención del tipo de enfoque científico que en el siglo VI inauguró una nueva era en la historia del pensamiento sistemático: la retrotracción de varios fenómenos a unas pocas causas, la reducción de la cualidad a la cantidad, el uso de consideraciones de simetría y el empleo de modelos mecánicos. Todos ellos han sido extraídos de la doctrina de los filósofos milesios, notable por su racionalismo.

Elementos racionalistas similares se encuentran también en dos filósofos griegos del siglo V: en Empédocles y —aún más pronunciados— en Anaxágoras. Empédocles —de cuyo poema «De la Na-

turaleza» se conservan algunos fragmentos— fue un filósofo y místico, científico y médico. La diversidad de sus intereses, y de la expresión intelectual que les confirió, hacen difícil formarse una imagen clara del papel que desempeñó en el terreno que aquí nos concierne. Hay, sin embargo, algo que puede afirmarse con certeza: que debemos a Empédocles un añadido teórico vital para los cimientos de la ciencia, el concepto de que todos los fenómenos dependen de fuerzas universales que actúan en el cosmos. Los filósofos milesios nunca tuvieron en consideración el problema de la causa en general; para ellos las transformaciones que acontecen y las formas constantemente cambiantes de la materia primordial y sus movimientos, eran datos últimos y atributos del primer elemento. Empédocles fue el primero que distinguió la materia de la fuerza y es en la distinción misma donde radica la gran originalidad de Empédocles, no en su definición de la fuerza como un tipo de elemento material de naturaleza enteramente activa —por contraste con la materia por ella activada. En lo tocante a la materia en sentido estricto, propuso explícitamente la existencia de cuatro elementos —fuego, aire, agua y tierra— y, al hacerlo, volvió la espalda a la tendencia monística de la escuela milesia dando forma a un nuevo concepto de materia que, con pocas excepciones, permanecería en vigor hasta el desarrollo de la química moderna. Si tenemos en mente que el agua y el aire habían sido postulados como elementos por Tales y Anaxímenes, y que el fuego desempeñó un papel similar, aunque no enteramente idéntico, en la doctrina de Heráclito, podremos entender las siguientes palabras de Aristóteles: «...Empédocles, los cuatro, añadiendo además de los mencionados, en cuarto lugar, la tierra (pues según él, éstos subsisten siempre y no son objeto de generación, a no ser por multiplicación o reducción numérica, juntándose o separándose hacia la unidad y a partir de ella)» [45].

Estos cuatro elementos subyacen a toda la variedad de cualidades que encontramos en el mundo sensorial. Las cualidades son compuestos de estos elementos, pero estos mismos no están sujetos a cambio o disgregación. Aristóteles —que pensaba que toda mezcla genuina traía consigo un cambio en la cualidad de los componentes— no estaba de acuerdo con ese punto de vista: «Uno puede preguntarse con asombro cómo es posible que quienes (como Empédocles) dicen que los elementos de los cuerpos son más de uno y, por eso, no se transforman entre sí, afirmen también que los elementos son com-

parables. Y, en verdad, Empédocles expresa: "Pues todos ellos son iguales"» [46]. Esta completa igualdad de los cuatro elementos fue un hecho aceptado durante largo tiempo; después, el efecto obvio de los procesos térmicos, combinado con las antiguas teorías sobre la fuerza del fuego, dieron una posición de preeminencia a ese elemento. A continuación el aire fue añadido como un segundo elemento activo en atención a su elasticidad y su cercanía al elemento caliente; de ahí que en el período post-aristotélico, y especialmente en la física estoica, encontremos los elementos divididos en activos (fuego y aire) y pasivos (agua y tierra). Los cuatro elementos se combinan y separan y son esas combinaciones y separaciones las que constituyen los procesos del mundo físico.

De acuerdo con Empédocles, esa creatividad es el resultado de la acción de dos fuerzas que llama «Amor» y «Discordia» y que, poéticamente, describe así: «Un relato doble te voy a contar: en un tiempo todas las cosas de una pluralidad pasaron a constituirse en unidad, y en otro pasaron de unas, a ser múltiples... Jamás cesan en su constante cambio, conviniendo unas veces en la unidad por efecto del Amor y separándose otras bajo el odio de la Discordia. Así, en la medida en que aprendieron a desarrollarse en una unidad a partir de una pluralidad y, de nuevo, cuando dejan de ser unas se convierten en plurales, así nacen y no tienen una vida estable. En ese sentido permanecen siempre inmóviles, pues en realidad siguen un proceso cíclico» [41]. Todos los comentaristas han concordado en que Empédocles concebía dichas fuerzas como cantidades físicas extendidas en el espacio, mas siendo distintas de los cuatro elementos. Sería, pues, una imprecisión, suponer que los cuatro elementos materiales, junto con las dos fuerzas, formaban un conjunto de seis elementos. «El postulaba cuatro elementos físicos —fuego, aire, agua y tierra—, que son eternos y están sujetos a cambio en mayor o menor medida a través de la mezcla o la separación. Hay también dos principios últimos —por los que se mueven los anteriores— que son el Amor y la Discordia. Puesto que los elementos están necesariamente en un constante movimiento, entremezclándose a veces por el Amor, y separándose otras por la Discordia, de tal modo que —en su opinión— hay seis principios» [47].

Probablemente Empédocles tenía una razón bastante clara para introducir las dos fuerzas como causa de lo que ocurre en el cosmos: con la combinación de esas dos fuerzas opuestas —atracción y re-

pulsión— es posible describir la dinámica de los acontecimientos a escala cósmica mediante una integración —por así decirlo— sobre todo el campo cósmico. Empédocles concibió la existencia del cosmos como un equilibrio dinámico entre las fuerzas de atracción y repulsión, posibilitando al mismo tiempo la alternancia de los períodos del mundo según detentase la supremacía una fuerza o la otra. «Y lo mismo puede decirse de la concepción que admite que es la naturaleza quien así lo ordena y que en ello ha de verse un principio; precisamente lo que parece ser la opinión de Empédocles, según el cual, el poder y la acción motriz que alternativamente poseen el Amor y el Odio, pertenecen a las cosas por necesidad, del mismo modo, pues, que el reposo en los períodos intermedios» [48]. La fuerza de atracción da lugar al entremezclado de los elementos opuestos, mientras la fuerza de repulsión es la causa de su disgregación y vuelta a la forma segregada originaria.

El párrafo de Aristóteles que acabamos de citar es, sin duda, una idealización de esas fluctuaciones en condiciones dinámicas puras. De hecho, es imposible concebir que el cosmos esté gobernado por una sola fuerza y, como se dice en otro fragmento del poema de Empédocles, las fuerzas deben aumentar y disminuir alternativamente: «Como ambos [Amor y Odio] fueron anteriormente, así serán de nuevo, y nunca —según pienso— carecerá de ellas el infinito Tiempo» [42].

La cita [48] de Aristóteles es especialmente interesante porque menciona, a la par que las fuerzas opuestas, el concepto de «necesidad», uno de los empleados por la antigua ciencia griega para expresar las conexiones causales existentes entre los fenómenos. En opinión de Aristóteles —coincidiendo con nuestra propia impresión—, Empédocles consideraba al Amor y al Conflicto la causa de los cambios de los fenómenos, especialmente del movimiento de la materia bajo el influjo de la atracción y la repulsión. En tal caso Empédocles, a su modo poético y cualitativo, habría sido el primero en postular la realidad de las causas en el mundo físico y en identificarlas con fuerzas. El físico moderno queda fascinado ante la intuición que llevó a Empédocles a proponer la existencia simultánea de ambas fuerzas, puesto que, de acuerdo con nuestra actual experiencia, él mismo se ha visto obligado a introducirlas. En oposición a la fuerza atractiva de gravitación hay fuerzas cósmicas activas de repulsión que dan lugar a la expansión del universo merced a la deriva

de las galaxias. En el mundo atómico conocemos las cargas eléctricas positiva y negativa que repelen a las de su mismo signo y atraen a sus opuestas, pero tampoco en la física nuclear se puede dejar de asumir la existencia de fuerzas repulsivas y atractivas. El principio de que «dos cuerpos no pueden ocupar el mismo lugar» es, por tanto, válido —de una forma u otra— en toda circunstancia y en toda dimensión.

Hasta aquí hemos considerado fundamentalmente las características básicas del enfoque científico conformado en los siglos VI y V a.C., el cual, pese a las formas tan variadas que ha adoptado, se ha mantenido esencialmente inalterado hasta el presente. Uno de sus principios básicos, el considerar el cosmos en términos de número y medida, será discutido por extenso en el capítulo segundo. Aquí reseñaremos unos cuantos logros más que contribuyeron al progreso realizado en el siglo V y que, asimismo, son obra de dos científicos ya mencionados, Empédocles y Anaxágoras.

Empédocles hizo dos descubrimientos físicos de relieve. En primer lugar, reconoció que el aire tiene los atributos de un cuerpo y, en segundo, enseñó que la luz se propaga a través del espacio y requiere de tiempo para dicha propagación.

El primer descubrimiento es descrito por él en el curso de una explicación de la respiración, y como prueba menciona el hecho de que al sumergir en agua un recipiente antes de que el aire haya sido expulsado de su interior, el agua no consigue penetrar en el interior de aquél. El recipiente en cuestión es la clepsidra: «Como cuando una niña jugando con una clepsidra reluciente de bronce coloca su hermosa mano sobre la embocadura del caño y sumerge el recipiente en la masa profunda de las plateadas aguas; el volumen interior del aire al presionar desde dentro sobre los distintos agujeros retiene el agua fuera hasta que ella destapa la condensada corriente [de aire] *. Es entonces cuando, de golpe, el aire fluye hacia afuera mientras el agua lo hace hacia dentro en igual proporción» [43].

La teoría de la luz de Empédocles es descrita por Aristóteles como sigue: «Empédocles dice que la luz del Sol recorre los espacios interpuestos antes de alcanzar la Tierra o el ojo» [49]. Un comentarista posterior hizo una descripción más precisa: «Empédocles dijo que la luz es una sustancia fluida que, emitida desde una fuente de luz, alcanza primero la región entre la Tierra y el cielo y desde allí llega hasta nosotros, aunque no seamos conscientes de su movimiento

debido a su velocidad» [50]. Ambos supuestos han sido confirmados por la ciencia moderna. La teoría electromagnética de la luz, y asimismo la teoría cuántica, han mostrado que la luz es una «sustancia fluida» y, lo que es más, en 1675 el astrónomo danés Roemer descubrió que la velocidad de la luz es finita e hizo un primer cálculo aproximado de su valor. Una generación antes, Galileo había ya expresado la creencia en que dicha velocidad, aunque muy grande, era finita.

La descripción de la luz como una sustancia que fluye y es emitida por cuerpos radiantes planteó un problema muy discutido a lo largo de toda la época antigua; concretamente, el de la interacción de los cuerpos y la estructura de la materia. La escuela atomista —que también se retrotrae al siglo v— y los estoicos del siglo III en adelante, desarollaron puntos de vista diametralmente opuestos sobre ese problema. Los primeros postulaban la emisión de partículas y conglomerados de partículas desde cuerpos que se consideraban, asimismo, de estructura granular. Los últimos, por el contrario, mantenían una teoría del continuo absoluto, suponiendo que la propagación de los procesos físicos se realizaba de cuerpo a cuerpo en forma de ondas. En la doctrina de Empédocles y Anaxágoras encontramos la primera tentativa de formulación de ambas opiniones. Como todos los hombres de ciencia —a excepción de los atomistas—, ambos negaron la existencia del vacío. La prueba de ello la encontramos en Aristóteles *(De Caelo)* y en el siguiente fragmento de Empédocles todavía conservado: «...ninguna parte del Todo que está vacía o saturada» [44]. Esta frase expresa el dilema en que se encontró al tratar de reconciliar la estructura granular de la materia con la inexistencia del vacío. Dicha estructura es descrita por él como algo poroso, siendo los poros los receptores del influjo de otros cuerpos: «Algunos filósofos son de la opinión de que cada cosa sufre una pasión cuando el agente último y más propio penetra en ella a través de ciertos poros, y afirman que de esta manera vemos, oímos y percibimos las demás sensaciones. Asimismo, agregan que vemos a través del aire, del agua y de otros cuerpos diáfanos, porque éstos poseen poros invisibles por su pequeñez, pero abundantes y dispuestos en hileras, y tantos más poros tienen cuanto más diáfanos son. Así pues, hay quienes explican de esta manera —como es el caso de Empédocles— algunas otras cosas y no solamente las que obran de agente y paciente, sino que dicen que entran en combinación to-

dos aquellos cuerpos cuyos poros son conmensurables entre sí» [51]. Los líquidos que no se entremezclan, como el aceite y el agua, carecen de dicha conmensurabilidad recíproca. «El dice que, en general, la mezcla es el resultado de la simetría de los poros y, por tanto, el aceite y el agua no se mezclan, aunque sí lo hacen otros líquidos, dando una lista de sus mezclas específicas» [52].

Filopón, uno de los comentaristas posteriores, subraya que Empédocles representaba los poros como si estuviesen llenos de una materia rarificada semejante al aire. En lugar de aire, podría haber dicho éter, sustancia cuya existencia había sido también conjeturada por Anaxágoras y que era concebida como la más rarificada de las formas existentes de la materia. El éter fue inventado, por así decirlo, para garantizar la inexistencia del vacío y fue elevado después por Aristóteles a la categoría de un quinto elemento. Así considerado pasó de generación en generación hasta que su existencia fue cuestionada en el siglo XIX, siendo finalmente rechazado por los científicos del siglo XX.

El segundo aspecto de la teoría de los poros —que en cierto sentido es complementario del primero— es la admisión de que hay emanaciones de los cuerpos: «De acuerdo con Empédocles, todas las cosas creadas producen emanaciones. Estas no sólo fluyen incesantemente de los animales y las plantas, de la tierra y el mar, sino también de las piedras y el bronce y hierro. Por tanto, todo se consume debido a la constante corriente emanada desde sí» [53].

Empédocles trató de explicar el magnetismo sobre la base de esta teoría de las emanaciones y de la asunción de una simetría entre las procedentes de un cuerpo y los poros de otro: «¿Por qué atrae el imán al hierro? Empédocles dice que el hierro es empujado hacia el imán porque ambos producen emanaciones y porque el tamaño de los poros del imán corresponde a las emanaciones del hierro... Así, cuandoquiera que las emanaciones del hierro se aproximan a los poros del imán y se adaptan en forma, el hierro es arrastrado tras las emanaciones y atraído» [54].

Anaxágoras, como Empédocles, vivió a mediados del siglo V a.C. Originario de Jonia, estaba imbuido del mismo espíritu racionalista que caracterizó a la Escuela milesia. Se estableció en Atenas en la época de Pericles y el influjo de sus teorías científicas puede rastrearse hasta la literatura helenística tardía. Anaxágoras intentó probar la inexistencia del vacío por medio de experimentos y mostró

que el aire —que a veces era identificado con el vacío— poseía cualidades físicas. Además de repetir los experimentos de Empédocles con la clepsidra, comprimió también el aire en pellejos de vino —según cuenta Aristóteles— y mostró que el aire ofrece resistencia cuando los pellejos son exprimidos. Anaxágoras no sostenía la teoría de los poros de Empédocles, pero sí postulaba la absoluta continuidad de la materia. Sus puntos de vista sobre la estructura de la materia y sobre la mezcla de tipos diversos de materia eran, sin embargo, completamente diferentes a los de Empédocles. Anaxágoras abordó la cuestión desde una perspectiva biológica y trató el problema del metabolismo. ¿Cómo pueden alimentos simples como el pan y el vino transformarse en la carne, tendones, huesos y piel del cuerpo vivo? La respuesta debe ser que éstos contienen en sí mismos algo de aquéllos, y lo mismo debe ser cierto de todo tipo de semillas. De este modo Anaxágoras llegó a la formulación de su «teoría de las semillas» o como después sería llamada, la teoría de la «similaridad de composición»: «Uno ha de creer que en todos los productos compuestos hay todo tipo de cosas y las semillas de todas las cosas, las cuales contienen todo tipo de formas, colores y deliciosos sabores» [56].

En otro fragmento encontramos: «Porque en todo hay una porción de todo... pero cada cosa singular es y fue, sin duda, básicamente aquello de lo cual contiene más» [57]. Los comentaristas posteriores explicaron más detalladamente que Anaxágoras asumió la existencia de innumerables elementos, cada uno de los cuales estaba contenido, como una semilla, hasta en la más pequeña cantidad de materia. Ese cuerpo que nos parece «oro», contiene primordialmente granos-de-oro, pero también semillas de todos los elementos existentes. Tal es la solución continuista dada al problema de la mezcla. Más tarde, en la doctrina de los estoicos, fue combinada con la teoría de Empédocles de los cuatro elementos y fue presentada de un modo casi extravagante.

En astronomía los avances fundamentales de Grecia, con respecto a Babilonia y Egipto, se consiguieron a partir del siglo IV. No merece la pena entrar a considerar los detalles de las conjeturas de Empédocles en este campo, salvo para señalar que era consciente de la fuerza centrífuga que actúa cuando un cuerpo es volteado circularmente. A fin de explicar por qué la Tierra permanece en su sitio,

tomó el ejemplo de una copa de agua transportada en el extremo de una cuerda y a la que se hace girar en un círculo vertical: «Otros concuerdan con Empédocles en que es la suma suavidad del movimiento del cielo conforme gira en un círculo, lo que impide el movimiento de la Tierra. La comparan a ésta con el agua de una copa que de hecho, cuando la copa es girada en círculo, por esa misma causa no cae, pese a que con cada vuelta se encuentre debajo del bronce y por naturaleza se mueva hacia abajo» [55].

Anaxágoras también utilizó de algún modo en su cosmogonía la fuerza centrífuga, pero este tema será tratado en un capítulo posterior haciendo especial hincapié en su modelo del torbellino, algunos de cuyos elementos se encuentran también en la cosmología de Descartes. Ambos pensadores asumieron que el éter —ese tipo extremadamente rarificado de aire que llena el universo— tiene un movimiento circular constante y arrastra consigo a las estrellas, impartiéndoles así un movimiento circular. Descartes, viviendo como lo hizo en una época heliocéntrica, situó al Sol en el centro de revolución, mientras que para Anaxágoras la Tierra era el centro. «El Sol, la Luna y todas las estrellas son piedras en llamas transportadas en círculo por la revolución del éter» [62]. De este modo —mediante un simple modelo mecánico y la postulación de un medio invisible que ocupa el espacio entre el centro y los cuerpos incorporándolos a su movimiento— las revoluciones de los cielos fueron explicadas con un solo mecanismo. La gran importancia de Anaxágoras en los anales de la astronomía radica en su enfoque mecánico, que es la continuación lógica del enfoque racional establecido por Anaximandro. Las hipótesis astronómicas de Anaxágoras están ampliamente dominadas por un enfoque «terrestre» que no distingue entre los fenómenos que ocurran «allí», en el cielo, y los que ocurren «aquí», en la Tierra, proporcionando así una valoración puramente física de los datos astronómicos y de sus posibles causas. Los cuerpos celestes no son nada más que piedras inflamadas, «el Sol es mayor que el Peloponeso» [62]. ¡Qué desinhibida libertad de pensamiento se revela en esta comparación del más poderoso de los cuerpos celestes —convertido en apoteósico por las fuertemente enraizadas creencias mitológicas— con un objeto geográfico, una porción de la Tierra habitada! Hoy en día tal tipo de racionalización es un lugar común, pero la brecha abierta por Anaxágoras en la fortaleza de la mitología

por uno de sus puntos más sólidos, fue un acontecimiento que pocos paralelos ha tenido en la historia del mundo antiguo.

Hasta qué punto sus logros eran revolucionarios puede apreciarse en su opinión sobre el origen del gran meteoro que cayó en Egos Pótamos: «Es algo comúnmente admitido, que una enorme piedra cayó del cielo en Egos Pótamos, la que muestran desde entonces los habitantes de Quersoneso, siendo tenida en veneración. Se dice de Anaxágoras que sostuvo que la piedra procedía de alguno de los cuerpos celestes en el que se había producido un terremoto o un corrimiento de tierras, con el resultado de que dicha piedra fue arrancada y cayó sobre nosotros, pues ninguna estrella permanece en el lugar en que fue creada. Las masas de esas pesadas piedras brillan debido a la resistencia del éter circundante y por verse forzadas a seguir el movimiento del torbellino y la presión de la esfera a la que están sujetas» [63].

La mayor parte de los astrónomos griegos aceptaron la teoría de Anaxágoras de que la Luna no tiene luz propia, sino que «es el Sol el que proporciona a la Luna su brillo» [64]. Una excepción fue Posidonio el Estoico (siglo II a.C.), quien volvió a mantener la anterior opinión de que la Luna emite luz propia. En escritores posteriores hay también referencias a la doctrina de Anaxágoras de que «la Luna tiene partes habitadas, así como montañas y valles» [65], tema que es ampliamente discutido en *De la cara en el orbe de la Luna*, de Plutarco.

Aunque es cierto que en términos generales las ideas astronómicas de Anaxágoras eran primitivas y no muy originales, ello no le resta importancia como pionero del concepto de unidad entre los fenómenos celestes y terrestres. Esa fue la razón que le enfrentó con las autoridades, siendo acusado de ateísmo, sentenciado a prisión y sólo liberado gracias a la intervención personal de Pericles, abandonando poco después Atenas para volver a su tierra natal. Pero en la historia de la ciencia tiene también asegurado un lugar de honor como el primer pensador que subrayó la dependencia de nuestra experiencia física de los sentidos: «No somos capaces de juzgar la verdad a causa de la debilidad de nuestros sentidos» [60], probando su afirmación con un simple experimento con el que mostraba que no podemos distinguir el leve cambio producido en un color cuando le es añadido otro gota a gota. Junto a su reconocimiento de las

limitaciones de la percepción sensorial, hizo la importante afirmación de que la sensación proporciona evidencia a aquellas entidades que no pueden ser aprehendidas por nuestros sentidos: «Las apariencias visibles abren la visión de lo invisible» [61]. Este reconocimiento se convirtió en uno de los principios básicos para los atomistas griegos y, más tarde, la teoría atómica moderna lo ha hecho pasar de ser una hipótesis a ser un hecho.

Capítulo II
NATURALEZA Y NUMERO

«Alcé mis ojos, miré y vi a un varón que tenía en la mano una cuerda de medir.»

ZACARÍAS 2 (5) 1

En el primer capítulo hemos discutido los cimientos de la ciencia que fueron asentados en los siglos VI y V a.C., hemos dado ejemplos de aquellos primeros comienzos del enfoque científico tal como se nos revelan en las doctrinas de la materia y la fuerza de la escuela milesia y en las enseñanzas de Empédocles y Anaxágoras. En ellas brotó el germen de esa corriente de pensamiento que condujo hasta la escuela atomista, la alquimia y la química, y a nuestra teoría contemporánea de la materia. Pero ése no es el único capítulo científico inaugurado en aquel período, hay otro de, incluso, mayor importancia por sus miras y repercusión: el primer intento de considerar al cosmos y lo que en él ocurre, en términos de número y medida. El trabajo pionero de Pitágoras y su escuela en este terreno, fue continuado por Platón y los matemáticos de la época helenística, para finalmente cobrar un nuevo significado con Galileo, Kepler y la física matemática de Newton a nuestros días.

A este respecto, debería también subrayarse la importancia del rico legado científico que los griegos heredaron de Egipto y Babilonia, especialmente en matemáticas. Pitágoras, que estuvo durante varios años en esos países, estaba, sin duda, muy al corriente de los grandes descubrimientos realizados por los babilonios en aritmética, unos quinientos años antes de él, y adquirió gran maestría en la geometría egipcia, que se retrotrae a épocas todavía más antiguas.

Al mismo tiempo, sin embargo, si Pitágoras y sus discípulos no hubieran hecho sino añadir sus propios descubrimientos a esa herencia, su trabajo —aunque les asegurase un lugar de honor en la historia de las matemáticas— habría carecido del gran significado científico que le es atribuido.

Pitágoras nació en Samos, pero emigró al sur de Italia en la segunda mitad del siglo VI, reuniendo en torno a sí un grupo de discípulos que vivieron una vida en comunidad dedicada a los misterios de la filosofía y las matemáticas. Más de cien años después de su muerte, algunos de sus alumnos dejaron de respetar la orden del maestro de guardar secreto. De ese modo, la enseñanza oral originaria fue gradualmente complementada con textos escritos, algunos de cuyos fragmentos han sobrevivido. A partir de éstos y de los comentarios de Aristóteles y los filósofos posteriores —especialmente los neoplatónicos—, es posible llegar a conocer las líneas básicas de la doctrina pitagórica.

Pitágoras se concentró fundamentalmente en las propiedades de los números enteros, descubriendo algunos teoremas que deberíamos clasificar como pertenecientes a la aritmética o a la teoría elemental de números. Su método consistió en disponer en forma geométrica conjuntos numéricos en que cada unidad estaba representada por un guijarro colocado en el lugar correspondiente a un punto físico o geométrico. De este modo era posible disponer los enteros en una serie de hileras de puntos situados uno bajo otro. El resultado era un triángulo con el uno en su vértice y, bajo él, el número dos en forma de dos puntos, seguido de una hilera de tres puntos, y así sucesivamente. Si sumamos las hileras, obtenemos la serie de los «números triangulares», 1, 3, 6, 10, 15, etc. En esta disposición en hileras puede verse claramente que cada número triangular es igual a la suma de todos los enteros desde el uno, hasta la posición en la serie del número triangular en cuestión. Por ejemplo, el seis —el tercer número triangular— es la suma del uno, dos y tres; el diez —el cuarto en la serie— es la suma de los enteros del uno al cuatro, y así en adelante. Cuando recordamos que los griegos solían designar a los números con las letras del alfabeto —un sistema que oculta completamente las leyes de sucesión de una serie de números— se hace evidente a primera vista la superioridad del método de Pitágoras. El hecho simple y fundamental de que los enteros impares y pares se alternan se hace obvio en el triángulo de puntos de la fi-

gura 1, en que las hileras impares y pares aparecen unas tras otras. Dicho método de descripción también mostró a los alumnos de Pitágoras que los números y sus secuencias inhieren a los cuerpos físicos, del mismo modo que los guijarros son elementos de cuerpos más complejos. La unidad, el guijarro singular, es también un cuerpo en sí mismo, que puede disponerse en líneas, componiendo figuras en un plano que, a su vez, puede limitar cuerpos en el espacio. De la simple dimensión de la unidad avanzamos hacia las dimensiones superiores de la línea, de allí a la figura plana —como el triángulo, el cuadrado, etc.— y, finalmente, a la pirámide, el cubo y otros

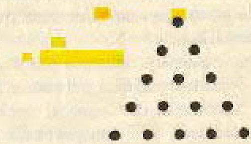


FIG. 1.—*Diagramas triangulares.*

cuerpos. Puesto que el cero era desconocido para los griegos, la unidad realizaba dos funciones: era tanto la unidad unidimensional de construcción, como el punto adimensional de contacto entre dos secciones. Así, los cuerpos perfectos son simplemente una idealización de los modelos físicos del cosmos, de ahí que pueda decirse que el número subyace a todos los objetos físicos y es el comienzo de todo.

Este es el origen de la filosofía de los números de Pitágoras cuya tendencia esotérica y mística la convirtieron en un credo. Aristóteles trató de describir desapasionadamente los supuestos básicos, aun desaprobando esa religión pitagórica y su influencia en su maestro Platón: «Pues bien, parece que también éstos [los pitagóricos] * consideran que el Número es principio, no sólo como materia para los entes, sino también como afecciones y hábitos, y que los elementos del Número son lo Par y lo Impar, siendo uno de éstos finito y el otro infinito, y que el Uno procede de estos dos elementos (pues dicen que es par e impar), y que el Número procede del Uno, y que el cielo entero —según queda dicho— es números» [22]. Vemos que el principio del número yace en un nivel de realidad apenas un

poco más profundo de lo que el principio de la materia primordial podría revelar, porque cualquiera que pueda ser tal materia, siempre adoptará la forma de un número en una cierta combinación geométrica o aritmética que posibilitará su formulación numérica o matemática. Cada sustancia que puede ser percibida por nuestros sentidos, aparece en una cierta disposición numérica y cada entidad física —sea una sustancia real, el estado de un sistema físico o un cambio que está sucediendo en él— puede siempre ser expresada en términos de número o mediante una fórmula matemática. Dicha concepción pitagórica es el punto de partida desde el que se desarrolló nuestra moderna matematización de los fenómenos físicos. En términos de Kant, es dominio de la ciencia cualquier cosa que pueda ser expresada en términos matemáticos.

Para entender la importancia de los números pares e impares en las enseñanzas pitagóricas, debemos volver a referirnos a la disposición en hileras de puntos físicos que dio lugar al concepto de número. Cada unidad es representada por una partícula separada de las otras por un cierto intervalo; ese aislamiento es lo que da lugar al número, bien sea a la unidad o al número compuesto de varias unidades. En este sentido, los pitagóricos postularon la existencia de espacio vacío; no como un concepto absoluto, sin embargo, como Leucipo y Demócrito, sino en un sentido relativo, siguiendo a Empédocles [23]. Ese vacío puede ser aire o éter, o cualquier medio «raro», supuesto que aísla al número o al cuerpo que lo represente, como si fuese una unidad separada.

En esta concepción del número como algo aislado en unidades discretas, se encuentra esa noción de la teoría atómica, de acuerdo con la cual, el cosmos es una colección de unidades físicas «llenas», separadas unas de otras por un vacío. Para Pitágoras, el número era la expresión de dos fenómenos básicos del mundo físico, la extensión y la figura. La materia que llena el espacio con su extensión es lo «ilimitado» y es representada por el número par, puesto que la característica más obvia de los pares es que pueden ser divididos en partes iguales. Cuando biseccionamos una de las hileras del triángulo de puntos de Pitágoras, no tocamos ningún límite si el número de puntos en la hilera es par, la línea divisoria pasa a través del espacio entre dos puntos. Pero si el número de puntos es impar, la línea entra en contacto con uno de éstos, punto que actúa como el límite que produce una cierta figura al convertirse una línea ilimi-

tada en una sección de longitud definida. Así, en las dimensiones superiores, la línea se convierte en el límite de una superficie, y ésta en el límite de un cuerpo. Puesto que los números pares e impares se alternan entre sí para producir la suma total de los enteros, el número se convierte, para Pitágoras, en la fuente de lo ilimitado y lo limitado, de la sustancia extensa y de la forma que limita su extensión. En palabras del filósofo pitagórico Filolao: «La Naturaleza en el universo está conjuntamente formada por lo No-limitado y lo Limitante, y lo están tanto el universo como un todo, como cada cosa en él» [16].

La cualidad fundamental de los números en virtud de la cual se combinan los opuestos sustancia y forma, es la armonía: «Es como es, por la Naturaleza y la Armonía. El Ser de las cosas es eterno y la Naturaleza misma requiere una inteligencia divina y no humana. Lo que es más, sería imposible para cualquiera de las cosas existentes incluso el ser reconocida por nosotros, si no existiese el Ser básico de las cosas, a partir del cual fue compuesto el universo, lo Limitado y lo No-limitado. Mas, puesto que estos elementos existen como distintos y no relacionados, sería claramente imposible que el universo hubiese sido creado con ellos a menos que hubiese también una armonía, en cuyo caso ésta brotaría. Ahora bien, las cosas que eran semejantes y estaban relacionadas no necesitaban armonía, pero aquellas que eran desemejantes y estaban desconectadas y desigualmente distribuidas, necesariamente han de ser mantenidas unidas por tal armonía, gracias a la cual están destinadas a perdurar en el universo» [17]. Este fragmento, como la mayoría de los que se conservan de Filolao, está lleno de una fe religiosa en el poder regulador del número y la armonía en el cosmos. No está fuera de lugar citar unos pocos fragmentos más, dado que el espíritu de que están imbuidos tuvo tan gran influjo sobre Platón:

«En efecto, todas las cosas cognoscibles tienen número; pues no se puede pensar ni conocer nada sin éste» [18].

«La naturaleza del Número y de la Armonía no admiten la Falsedad, pues nada tiene que ver con ellos. La Falsedad y la Envidia pertenecen a la naturaleza de lo No-limitado y de lo No-inteligente e Irracional. La Falsedad no puede vivir del Número, pues es enemiga y hostil a su naturaleza; mientras que la Verdad está relacionada, y en estrecha unión, con la especie del Número. Porque la naturaleza del Número es la causa de la conciencia, capaz de propor-

cionar una guía a todos los hombres ante lo que es confuso y desconocido. Ninguna de las cosas existentes clarificaría a cualquier otra, ni en sí misma ni en sus relaciones con otra tercera, si no existiese el Número y su esencia. Pues de hecho el Número, trayendo todas las cosas ante el alma, a través de la percepción sensorial, las hace reconocibles y comparables entre sí» [19].

Ese énfasis puesto sobre la interconexión de número y mundo sensorial —tal como aparece por primera vez en la doctrina de Pitágoras— pudo haber sido el origen de la explicación matemática del mundo físico en la línea de la teoría moderna, pero Platón interrumpió ese desarrollo, abandonando la creencia en que la armonía cósmica pudiese revelarse a través del contacto con el mundo sensible. La teoría platónica de las «ideas» dio lugar a la creencia de que el cosmos puede ser aprehendido por las matemáticas puras, siendo sólo oscurecido por el contacto con la materia y los fenómenos empíricos. Pero antes de llegar a esta cuestión concreta, habría también que examinar el efecto de la doctrina pitagórica sobre el carácter del cosmos griego.

No vamos a tratar de todos los vástagos místicos de la religión del número, la cual, con sus múltiples ramificaciones de los neoplatónicos en adelante, pasando a través de la Edad Media, finalmente llegarían a ser parte de la mística judeocristiana; ni consideraremos en toda su amplitud el impulso que esta doctrina dio a las matemáticas griegas que, en los trescientos cincuenta años siguientes a Pitágoras, sentaron los cimientos de la aritmética y exploraron todos los aspectos de la geometría. Sin duda es cierto que tanto la mística numérica, como las matemáticas, desempeñaron un cierto papel en el modelado de la concepción griega del cosmos, pero aquí nos ocuparemos sólo de la influencia directa ejercida por la escuela pitagórica sobre la aproximación racional a la comprensión de ese cosmos. A este respecto tres cosas merecen una mención especial: el concepto de perfección geométrica que forma parte del concepto de armonía, la importancia de la proporción matemática y el descubrimiento de los números irracionales.

Los cinco cuerpos perfectos, o cuerpos platónicos —como también son denominados—, son detalladamente discutidos por Euclides en la decimotercera sección de sus *Elementos*. De acuerdo con uno de sus comentaristas posteriores, tres de esos cuerpos fueron descubiertos por los pitagóricos, y los otros dos por Teteto, un con-

temporáneo de Platón. Cuatro de los cinco fueron dotados de significado cosmológico al asociarlos con los cuatro elementos: el cubo, limitado por cuatro cuadrados, fue asociado con la tierra; el tetraedro, limitado por cuatro triángulos equiláteros, con el fuego; el octaedro (ocho triángulos), con el aire, y el icosaedro (20 triángulos), con el agua.

Una mezcla de estas ideas pitagóricas con el atomismo de Demócrito, se convirtió en la teoría de la materia de Platón, tal como es descrita en su *Timeo*. Aquí nos limitaremos a la esencia de su doctrina.

Platón se esforzó por sostener la doctrina de Pitágoras acerca de la armonía numérica que impone forma a la materia. Cada uno de los cuatro elementos físicos tiene su propio molde numérico y como la materia se extiende en el espacio, de ahí se sigue que dicho molde ha de estar ligado a una figura espacial geométrica. La matemática ha provisto convenientemente a aquellos que buscan tales figuras, con los cuerpos perfectos, de los que pronto se descubrió eran un número de cinco. Tres de ellos están limitados por triángulos, uno por cuadrados, y el quinto, el dodecaedro, por pentágonos regulares. La consideración decisiva a la hora de escoger los cuatro primeros cuerpos fue la necesidad de encontrar un elemento común en todos ellos y tal necesidad surgió del hecho de que a través de la mezcla los elementos se convierten en la fuente de todos los fenómenos materiales. Una vez más, se recurrió al principio generativo de Pitágoras por el cual una figura de ciertas dimensiones está formada de elementos de las dimensiones precedentes. Una línea, por ejemplo, está compuesta por una hilera de puntos; del mismo modo, las caras de un cuerpo perfecto y su disposición espacial delimitan al cuerpo en el espacio. La solución más simple era encontrar un «común denominador» para los cuerpos limitados por triángulos y para el cubo, pues si dividimos por la mitad un cuadrado, también obtenemos un triángulo que, aunque no sea equilátero, es, al menos, isósceles, que con su ángulo recto repara la carencia de perfección en sus lados. El triángulo perfecto puede, asimismo, ser dividido por su perpendicular, en triángulos rectángulos, aunque de un nivel de perfección inferior (en lugar de dos lados iguales, encontramos en ellos que uno de los lados adyacentes al ángulo recto está en la proporción de uno a dos con respecto a la hipotenusa).

Combinando ideas pitagóricas y democríteas, Platón introdujo esos dos triángulos rectángulos como elementos «atómicos» en su teoría de la materia. De las combinaciones de esos átomos planos y sus disposiciones espaciales, se crean los cuatro elementos, que pueden mezclarse y convertirse unos en otros. Cierto es que los pentágonos que forman el dodecaedro no pueden fragmentarse en triángulos rectángulos, pero incluso para eso se encontró una salida al introducirse el éter en la imagen cósmica, como la más fina y pura de las sustancias, cuyo dominio estaba en los niveles superiores del cosmos, en las regiones de las estrellas; el quinto de los cuerpos perfectos fue, así, asociado con el quinto de los elementos de la terminología aristotélica.

Este tema de los cinco cuerpos perfectos tiene además una importancia añadida porque su estudio condujo a los discípulos de Pitágoras a reconocer el valor cosmológico de la esfera. Fueron ellos los primeros en enseñar que la Tierra y todo el universo son redondos: «Se dice que él [Pitágoras] fue el primero en llamar a los cielos cosmos y a la tierra una esfera» [24]. Sin duda este descubrimiento se debió, en parte, a la visión de la sombra redonda de la Tierra al cruzar la superficie de la Luna durante un eclipse. Pero también probablemente no menos decisivas fueron las consideraciones «teóricas», en especial en lo tocante a la esfericidad del cosmos que contiene a todos los elementos físicos del mismo modo que la esfera contiene todos los cuerpos perfectos: «Los cuerpos de la Esfera son cinco: el Fuego de la Esfera, el Agua, la Tierra y el Aire y, en quinto lugar, el vehículo de la Esfera» [20]. Las últimas palabras de esta afirmación de Filolao parecen contradecir la interpretación usual, pero, además de una posible corrupción del texto, debemos tener en cuenta la importante posición que el éter había llegado a ocupar con el curso del tiempo. En este pasaje la noción de éter ha pasado a identificarse virtualmente con la esfera de las estrellas fijas. En todo caso, tal era la concepción de Teón de Esmirna (siglo II a.C.), a quien debemos las anteriores palabras de Filolao.

El descubrimiento de la figura esférica de la Tierra fue la principal contribución de la escuela pitagórica a la astronomía, pero sus otras conjeturas cosmológicas también ejercieron una considerable influencia sobre la historia de esa disciplina y deberíamos decir algo más sobre ellas.

Pitágoras descubrió que la armonía de los números se manifestaba en su forma más sorprendente en las razones matemáticas entre varios números que adoptaban la forma o bien de proporciones, o bien de relaciones geométricas. Las proporciones serán discutidas más adelante en relación con la armonía musical.

El más famoso de los teoremas geométricos —que tiene también relevancia algebraica— es el que todavía es conocido con el nombre de Pitágoras: en un triángulo rectángulo, la suma de los cuadrados de dos de sus lados es igual al cuadrado de la hipotenusa. Los egipcios habían descubierto ya, empíricamente, que tres secciones de 3, 4 y 5 unidades de longitud, respectivamente, forman un triángulo rectángulo, pero quedó para la escuela pitagórica —quizá para el propio Pitágoras— el hallar la prueba general y el descubrir otros números «pitagóricos» que satisficieran el teorema, por ejemplo los 5, 12, 13 ó los 8, 15, 17, etc. Este descubrimiento que establecía que los enteros se adecúan a una ley geométrica, junto con la costumbre pitagórica de representarlos por hileras de guijarros, dieron lugar a nociones que pronto mostraron ser falsas y que se habían basado en una especie de teoría naif del «atomismo» geométrico, de acuerdo con el cual, las razones entre cantidades geométricas podían ser expresadas por razones entre enteros, como si se asumiera que ambas podían reducirse al común denominador de los puntos geométricos contenidos en ellos. Sin embargo, los mismos discípulos de Pitágoras hallaron que los elementos de incluso las más simples y perfectas formas geométricas, mantenían entre sí razones que no pueden expresarse en semejantes términos racionales. El descubrimiento de que hay números «carentes de logos», números irracionales, resquebrajó los cimientos de la creencia pitagórica en la armonía esencial inherente al mundo físico, y durante largo tiempo se mantuvo en secreto. Más tarde, sin embargo, sirvió de estímulo para una más profunda comprensión del mundo de los números y del continuo de los puntos geométricos con que se correspondía.

La existencia de un número irracional se mostró, por primera vez, en la demostración de que las longitudes del lado de un cuadrado y de su diagonal no pueden expresarse como una razón entre dos enteros. De la aplicación del teorema de Pitágoras a un triángulo isósceles rectángulo, se sigue que hay dos cuadrados cuya razón es igual a dos; la asunción de raíces racionales para dichos cuadrados conduce, sin embargo, a una contradicción y Aristóteles utiliza ese

caso como ejemplo de prueba negativa: «La diagonal del cuadrado es inconmensurable con el lado porque si supusiéramos que es conmensurable, los números impares serían iguales a los pares» [139]. Platón también menciona la irracionalidad de los números no-cuadrados hasta llegar a la raíz de 17: «Al hablarnos de las potencias, mostraba Teodoro que las de tres y cinco pies no son, en cuanto a su longitud, simétricas a las de uno, extremo éste que comprobaba al tratarlas una a una hasta llegar a la de diecisiete pies» [122]. Y sigue explicando que las raíces de todos los números que no son cuadrados, son irracionales.

El descubrimiento de los números irracionales tuvo importantes consecuencias. En primer lugar, la imposibilidad de representarlos mediante razones de enteros, o como nosotros diríamos, mediante fracciones «racionales», condujo a la búsqueda de aproximaciones, encontrándose, así, que el número irracional tiene vecinos racionales a ambos lados, es decir, que podemos encontrar dos números racionales, uno mayor y otro menor al irracional, que tienen casi el mismo valor que él y que lo encierran dentro de límites estrechos; dicho confinamiento puede ser infinitamente estrechado de modo que el número irracional quede como «atrapado» por números racionales. El método de aproximación reemplazó a la perdida armonía pitagórica y se convirtió así, en una poderosa herramienta para la comprensión de realidades tanto matemáticas como físicas. La ciencia aprendió con ello la gran lección de que a la realidad sólo puede acercarse mediante innumerables aproximaciones.

El descubrimiento de los números irracionales condujo, pues, al rechazo de la imagen pitagórica de los puntos físicos extendidos en hilera y fue reemplazada por la idea, más aguda, de continuo. Cada línea es infinitamente divisible, es decir, el número de puntos que hay en ella es infinito y a partir de ahí el problema de la infinidad —no la infinitud de la extensión, sino de la división— abrió un nuevo mundo a la ciencia.

El problema lo planteó de forma sumamente provocativa Zenón, uno de los discípulos de Parménides de Elea, en sus famosas paradojas de la infinitud y aunque Aristóteles resolvió algunas de ellas, fueron los estoicos —en el siglo III a.C.— los que más profundamente captaron la noción de continuo. Pero esta cuestión constituye el tema de un capítulo posterior.

Lo que es un hecho es que fue en geometría donde las matemáticas griegas hicieron uso por primera vez del método de límites, cuyos comienzos fueron establecidos por Eudoxo de Cnido (*c.* 409-356 a.C.) con su método de eliminación —método que sería después adoptado por Euclides y Arquímedes. El ejemplo clásico es la determinación de π realizada por este último, limitando el círculo entre dos series infinitas de polígonos, inscritos y circunscritos; la circunferencia del círculo aparecía así, como el límite común a los perímetros de tales polígonos.

La aplicación de este método está inseparablemente ligada a los conceptos de continuidad e infinitud, pero hasta la época moderna no pudieron ser resueltas las dificultades incorporadas a esta concepción dinámica de la realidad. La ciencia griega con su enfoque esencialmente estático apenas rozó la superficie del problema —salvo en contadas excepciones—, como veremos más adelante.

Volveremos ahora a la doctrina pitagórica de las proporciones, conectada con los descubrimientos realizados en el terreno de la armonía musical. Este fue el primer caso de aplicación de las matemáticas a un fenómeno físico básico y sus resultados fueron considerados por los pitagóricos como una confirmación decisiva de su doctrina del Número como fundamento de la realidad, siendo su justificable orgullo ante los éxitos alcanzados, lo que explica el horror que sintieron hacia los números irracionales.

Las leyes de la armonía musical fueron deducidas a partir de series de experimentos que, a la vista de la escasez de explicación sistemática en todo el período de la Antigua Grecia, se hacen especialmente dignas de atención. Debemos nuestra información sobre este tema fundamentalmente al pitagórico Arquitas, un originario de Tarento y amigo de Platón —como nos indicaba Porfirio en el siglo III d.C.—. Otra fuente son los escritos de Teón de Esmirna, que vivió en el siglo II de nuestra era. El cuenta que Pitágoras y sus discípulos llevaron a cabo experimentos con cuerdas de varias longitudes y grosores y que también variaban la tensión de éstas, con vueltas a los tornillos a los que estaban atadas. Igualmente se hicieron experimentos con instrumentos de viento de varias longitudes y con vasijas idénticas en tamaño y forma, que fueron llenadas con diferentes volúmenes de agua, con lo que se conseguía la vibración de columnas de aire de diferentes longitudes. Algunos de estos experimentos eran meramente cualitativos, pero los de cuerdas e instru-

mentos de viento fueron genuinas mediciones cuantitativas. El principal resultado fue el descubrimiento de las tres consonancias: la octava, la quinta y la cuarta. Las razones de longitud halladas para la octava fueron 1 : 2, para la quinta 2 : 3 y para la cuarta 3 : 4. La nota más alta es la producida por la cuerda más corta y la más baja, por la más larga. Los pitagóricos tuvieron también muy clara la relación entre tono y frecuencia, es decir, la cantidad de vibración de las cuerdas: «En la escuela de Eudoxo y Arquitas se enseñaba que la ley de la armonía musical depende de los números y, asimismo, que las razones dependen de los movimientos (de las cuerdas); un movimiento rápido produce una nota alta porque vibra continuamente y repiquetea en el aire con mayor frecuencia, mientras que un movimiento lento produce una nota baja por ser más tardo» [25], lo que muestra que el número más alto era asociado con la nota más alta, o sea, la cuerda más corta, de acuerdo con la ley de que las frecuencias son inversamente proporcionales a la longitud de las cuerdas, tal como la siguiente afirmación de Arquitas lo corrobora: «Si uno toma una barra y golpea lenta y débilmente un objeto, producirá una nota baja con su golpeteo, pero si lo hace rápida y enérgicamente, producirá una nota alta» [21]. Debemos indicar de pasada que otras partes de este mismo pasaje muestran que los pitagóricos todavía mantenían ideas inexactas sobre la propagación del sonido en el aire pues pensaban, erróneamente, que la velocidad de propagación dependía del tono de la nota. Mas aquí lo que nos interesa es, principalmente, la relación de las consonancias musicales con las matemáticas pitagóricas.

Las razones de las consonancias mencionadas antes son, 1 : 2, 2 : 3, 3 : 4 y están compuestas de los números 1, 2, 3, 4, que forman el «cuarteto» pitagórico (tetractis) y constituyen las primeras cuatro hileras del triángulo de puntos, sumando diez. A este número se le asignaba un lugar de honor en el credo pitagórico de los números y reclamará nuestra atención más tarde en relación con la cosmología pitagórica.

Con los números del cuarteto se pueden también construir dos proporciones matemáticas fundamentales: los números 1, 2 y 3, guardan entre sí una proporción aritmética, es decir, la diferencia entre el primero y el segundo es igual a la diferencia entre éste y el tercero; entre los números 1, 2, 4, existe una proporción geométrica, o sea, la razón del primero al segundo es igual que la del segundo

al tercero. Por otra parte, la tercera proporción fundamental —la armónica— está contenida en los números 3, 4, 6, que forman la base de la octava (3 : 6), la quinta (4 : 6) y la cuarta (3 : 4). La proporción armónica se define como sigue: la diferencia entre el segundo número y el primero es al primero como la diferencia entre el tercero y el segundo es al tercero.

La definición precisa de estas proporciones aparece en un pasaje de Arquitas en el que se subraya específicamente su conexión con la música. Es importante señalar que pueden también presentarse como medias: la media aritmética de a y c es $b = ½ (a+c)$, la media geométrica es $b = \sqrt{ac}$, mientras la media armónica viene definida por la ecuación $\frac{1}{b} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{a}+\frac{1}{c}\right)$. Yámblico (*c.* 300 d.C.) cuenta: «Antiguamente, en tiempos de Pitágoras y su escuela, sólo se conocían tres medias, la aritmética, la geométrica y una tercera que fue al principio llamada "subcontraria". Esta última fue después denominada "armónica" por la escuela de Arquitas e Hipaso porque abarca razones armónicas» [26].

Para ser exhaustivos deberíamos añadir que los pitagóricos también descubrieron la media armónica en las dimensiones del cubo: «Hay algunos que dicen que debería llamársele una media armónica, siguiendo a Filolao, porque inhiere a toda armonía geométrica, la cual —según ellos— es el cubo, perfectamente armonioso e idéntico en sus tres dimensiones. Esta media se refleja a sí misma, por completo, en el cubo: el número de lados del cubo es 12, el de sus aristas es 8 y el de sus caras 6. Ahora bien, 8 es la media armónica de 6 y 12» [27]). De hecho, la razón 6 : 8 : 12 es igual a la 3 : 4 : 6 que forma las consonancias básicas.

A partir de todos estos ejemplos será fácilmente comprensible cómo la teoría de los números se amplió en la escuela pitagórica a toda una filosofía en la que fueron combinados elementos científicos del tipo de los descubrimientos matemáticos y físicos, con una conciencia religiosa de la unidad del cosmos expresada en la armonía numérica. Los siguientes fragmentos de Arquitas dejan claro que el principio del número consiguió tanto reconocimiento como cualquier teoría científica moderna; en primer lugar, una ley general es inferida a partir de hechos singulares y después conduce al descubrimiento de detalles e interrelaciones adicionales que, a su vez, sirven

para confirmar la ley: «Los matemáticos me parecen tener una excelente capacidad de discernimiento y en modo alguno es extraño que piensen correctamente acerca de la naturaleza de las entidades particulares ya que, habiendo obtenido un excelente juicio acerca de la naturaleza del Todo, necesariamente habían de tener una adecuada idea de las cosas por separado. De hecho nos han proporcionado una clara visión de la velocidad de las constelaciones, sus salidas y puestas, así como de la geometría y los Números y la geometría de sólidos, y no menos de la música, pues todos esos estudios matemáticos parecen estar relacionados, pues tratan de cosas que están relacionadas entre sí, concretamente las dos formas del Ser» [21]. Arquitas se refería casi con certeza aquí al número y la medida por las que es controlado el universo.

Mediante un desarrollo natural, la universalidad del número condujo a Pitágoras a proyectar los hallazgos de su teoría de la armonía musical, a los cielos. Esos hallazgos mostraban que el cosmos era un sistema ordenado que podía expresarse en razones numéricas y que se había revelado parcialmente en la conexión existente entre las longitudes de las cuerdas vibrantes y las notas emitidas. Los planetas giran en círculos en el cielo a diferentes distancias del centro y con velocidades distintas, lo que fuerza en nuestra mente una analogía con la música: los movimientos de los planetas en sus cursos podrían ser comparados con las vibraciones de las cuerdas, y sus velocidades angulares con las frecuencias de tales vibraciones. Si la analogía tiene algún sentido, debería haber razones armónicas también en las dimensiones de los cielos, análogas a las razones de consonancias puras. Así nació la idea de la música de las esferas: «Ellos dicen de los cuerpos que giran alrededor del centro, que sus distancias a éste observan ciertas proporciones. Unos giran más deprisa, otros más despacio, emitiendo los lentos una nota baja en su movimiento y los rápidos, una nota alta, de modo que esas notas dependientes de las proporciones de las distancias, constituyen en conjunto una armonía... Si la distancia del Sol a la Tierra es, por ejemplo, doble que la de la Luna, y la de Venus tres veces superior, siendo la de Mercurio cuatro veces mayor, ellos infieren que hay una proporción aritmética también para los demás planetas, y que el movimiento de los cielos es armonioso» [28].

Osadía científica, profundidad poética y fervor religioso se combinaron para dar a esta teoría el poderoso atractivo que continuó

fascinando a los pensadores hasta la época moderna; sería entonces cuando Kepler le proporcionó un nuevo aliento al introducir la armonía de las esferas en sus conjeturas sobre la relación de las órbitas planetarias y los cuerpos platónicos. A diferencia de los pitagóricos, sin embargo, no aceptó en sentido literal la música de las esferas, osando plantearse el problema que ya se había planteado a la escuela pitagórica: ¿por qué no oímos el sonido de los astros en su curso? Los pitagóricos dieron una respuesta extremadamente hábil, como Aristóteles nos informa: «Estas consideraciones revelan que la teoría según la cual el transporte de los astros produciría música —ya que sus sonidos son armoniosos—, aunque ha sido presentada por sus autores de manera ciertamente ingeniosa y elegante, no corresponde, sin embargo, a la realidad. Según ciertos pensadores, cuerpos tan voluminosos deberían inevitablemente producir algún sonido con sus movimientos, ya que incluso los cuerpos que están sobre la Tierra lo hacen, aunque sus masas no sean tan grandes como las de esos astros, ni se muevan con tanta velocidad. Y ya que el Sol, la Luna y las estrellas, cuyo número y tamaño son tan enormes, realizan a semejante velocidad sus recorridos, es imposible que no nazca de ellos un sonido de intensidad extraordinaria. Partiendo de ello, así como también de que, en razón de sus distancias, las velocidades guardan entre sí las mismas razones que las notas de un acorde musical, ellos afirman que el canto producido por los astros en sus revoluciones, es armonioso. Y como parece inexplicable que no escuchemos ese sonido, consideran que la causa de ello es que, desde nuestra venida al mundo, ese sonido está con nosotros y, por tanto, no puede ser contrastado con un silencio que lo pusiera de manifiesto, ya que la percepción de ambos es correlativa y por ello —concluyen—, al igual que los forjadores se vuelven indiferentes al ruido con el hábito de estar rodeados por él, así los hombres se han convertido también en insensibles, por idénticas razones» [29].

La escuela pitagórica no hizo ningún intento por apoyar con datos empíricos su teoría de la armonía planetaria, ni sus oponentes pudieron refutarla numéricamente. Sin embargo, la idea misma y su gran popularidad, son de singular importancia para nuestra comprensión de cómo era concebido el cosmos por los griegos. La creencia en la unidad de geometría, música y astronomía es expresión de una más básica creencia en la unidad de hombre y cosmos.

Hay una estrecha relación entre las leyes de la armonía musical —construida sobre simples proporciones geométricas o numéricas— y un hecho fisiológico y psicológico tan fundamental como lo es la sensación de eufonía: «La Música es la aritmética del alma, la cual cuenta sin ser consciente de hacerlo» —tal como Leibniz lo expresara. Esta es una cuestión que todavía no hemos comprendido completamente pese a la teoría de la armonía musical de Helmholtz. ¿Cuál es el secreto, por ejemplo, de la armonía de la octava en la que percibimos la identidad de una nota repetida en un tono más alto? ¿Por qué adopta esta armonía, peculiarmente perfecta, la forma de la más simple de las proporciones, 1 : 2? Si el espectro visible cubriese más de una octava, ¿se produciría ópticamente una sensación similar?

Aunque probablemente los griegos no eran conscientes de todas estas cuestiones, instintivamente percibieron que tenían una vaga visión de los lazos que conectan la conciencia humana y el mundo exterior, un indicio de la participación humana en el esquema cósmico. La ciencia moderna, aunque sin negar la realidad de dicha participación, la ve de un modo diferente. Hoy aspiramos a proyectar las leyes matemáticas y físicas del universo material sobre el hombre, con el objeto de explicar los fenómenos de la vida mediante la física y las matemáticas, mientras que los griegos buscaban extrapolar lo humano a las dimensiones del cosmos y consideraban a éste un organismo vivo. Sus metáforas biológicas —como el aliento del cosmos— no son simplemente alegorías, significan realmente que el cosmos posee su propio ritmo vital, que sus leyes son básicamente orgánicas y que, por tanto, es consciente de la armonía musical de las esferas.

La concepción del mundo como un ser vivo estuvo presente en todas las épocas de la ciencia griega. Ninguna de las tendencias divergentes —del tipo de la teoría atomista— enraizaron muy profundamente en la ciencia del Mundo Antiguo. Más adelante veremos que en ello reside la diferencia esencial existente entre ésta y la ciencia moderna, pese a la similitud del enfoque científico formal. Dicha similitud tampoco puede ser dejada, sin más, en el olvido, pues hemos de estudiar tanto los puntos de semejanza como los de diferencia, si queremos hacernos una imagen completa.

La primera ley físico-matemática descubierta por los griegos era una ley de proporciones numéricas estrictas, ya que trataba de las

relaciones entre propiedades de una misma dimensión, como la proporción de las longitudes de cuerdas o las de las frecuencias musicales. Una segunda ley que también expresaba una proporción matemática y que fue formulada casi trescientos años después, fue la ley de la palanca de Arquímedes. También ésta tiene que ver con proporciones numéricas simples, ya que comparaba las longitudes de los brazos de la palanca con los pesos sobre los que se actuaba.

La física moderna, por su parte, comenzaba con la definición de cantidades dimensionales como velocidad, fuerza, presión, etc., construidas sobre dimensiones básicas del tipo de longitud, tiempo o masa y aunque estas cantidades no tenían el mismo valor general de los números, fueron de inestimable importancia como herramientas para la comprensión de la naturaleza. Los griegos sólo describieron realmente dos de esas cantidades dimensionales: Aristóteles reconoció la importancia de la velocidad y Arquímedes definió el peso específico —la proporción entre el peso de un cuerpo y su volumen. Antes de Arquímedes la física griega había sido incapaz durante cuatrocientos años aproximadamente, y pese a todos los esfuerzos, de liberarse del círculo vicioso de "lo pesado" y "lo ligero", debido, precisamente, a su incapacidad para definir el peso específico. Mas incluso los descubrimientos de Arquímedes en dirección a ese concepto, no pudieron eliminar completamente la antítesis absoluta de pesado y ligero y lo mismo ocurrió con la noción de velocidad, que siguió siendo excesivamente primitiva.

Así pues, no podía encontrarse mejor prueba de la idea pitagórica de que el número subyace a todos los atributos físicos, que esas cualidades físicas expresadas dimensionalmente, ya que un cuerpo es distinguible única y simplemente por la suma de esas cualidades que definen sus atributos físicos (peso específico, calor específico, constantes de elasticidad, viscosidad, etc.). En este sentido, hasta tiempos recientes no se descubrió todo lo que implicaba la concepción pitagórica. No obstante, también es cierto que hemos ido más allá y hemos descubierto que ciertas cantidades de ese tipo poseen un valor que sobrepasa con mucho el significado que pudieran tener en el fenómeno concreto en el que fueron descubiertas; cantidades denominadas "constantes universales", pese al hecho de que tengan un ámbito particular de aplicación. Un ejemplo es la velocidad de la luz, presente en la óptica, la electricidad y la teoría atómica; otra de las pocas cantidades que pertenecen a esta categoría es la constante

de Plank·o, de importancia incluso mayor, es el pequeño número de cantidades no-dimensionales —especialmente cuando tienen valor universal. Como hemos visto, se trata de simples números, es decir, aparecen como razones de cantidades en una misma dimensión; por ejemplo, el producto de la velocidad de la luz por la constante de Plank, tiene la misma dimensión que el cuadrado de la carga del electrón, cuya importancia como "cuanto de electricidad" es incuestionable. La razón de ambas cantidades es un simple número (con el valor aproximado de 1/137) y nadie duda hoy de que ese número —aunque todavía no enteramente comprendido— tiene un valor intrínseco en la estructura del mundo físico y es esa sensación de haber dado con una de las claves para una más profunda comprensión de la naturaleza, la que debieron experimentar los pitagóricos cuando descubrieron las proporciones de la armonía musical. Nosotros —como ellos— nos basamos en el supuesto de que las leyes físicas descubiertas en el laboratorio, gracias a instrumentos elaborados por el hombre, tienen la categoría de leyes universales y, pese a la situación puramente especulativa en que hoy se halla la cosmología, nos sentimos inclinados a conceder importancia a ciertas razones numéricas existentes entre cantidades cósmicas, aunque no hayamos logrado explicarlas satisfactoriamente.

Así, desde nuestro punto de partida de la ciencia moderna, podríamos decir que el método científico pitagórico era correcto. Cierto es que el campo concreto de investigación que ellos escogieron no parece, desde nuestra perspectiva, el más adecuado como punto de arranque para un estudio sistemático del mundo físico en su conjunto, pero tampoco podemos dejar de observar que su modo de afrontarlo es el mismo que el nuestro: partiendo de experimentos con diversos instrumentos, expresaron sus resultados en términos generales y aspiraron a la formulación matemática de leyes de aplicación universal. La predilección por la mística numérica en modo alguno desdice sus cualidades científicas; al contrario, en la medida en que les sirvió de estímulo para buscar leyes causales de la naturaleza, contribuyó al progreso científico. Los físicos teóricos de nuestros días, que tanto han avanzado en la comprensión de aquélla, creen igualmente, de modo casi religioso, en el poder del símbolo matemático y en la validez de las fórmulas y los cálculos. Precisamente por eso nos quedamos tan sorprendidos de que los principios pitagóricos acabaran por extinguirse en lugar de ser el punto de partida

para un estudio detallado cuantitativo de los fenómenos naturales en todos los campos científicos, y no sólo en astronomía. ¿Cuál fue la causa del declive de la escuela pitagórica y de la "religión" de los números?

No existe una respuesta sencilla a esta pregunta, pero apenas puede dudarse que uno de los factores decisivos fue el enorme influjo de Platón, cuya filosofía no pertenecía al tipo de las que apoyarían la prosecución de la línea científica pitagórica. El tema resulta especialmente fascinante debido a que hay elementos claramente pitagóricos en dicha filosofía platónica, como el repetido hincapié que se hace en los diálogos sobre la importancia del número, la aritmética y la medición. En el *Filebo,* por ejemplo, Sócrates pregunta: «Y en las artes productivas o artes manuales ¿acaso no hay una parte más cercana al conocimiento que otra? y ¿no podría considerarse una como pura y la otra como impura?»; y continúa: «Lo que intento decir es que si se eliminan de cualquier arte la aritmética, el peso y la medida, no será mucho lo que quede» [124].

Además, Platón no podría ser acusado de dar la espalda a la naturaleza, pues no pocos pasajes de varios diálogos —en que emplea metáforas innegablemente físicas— prueban justo lo contrario, lo que podría ser asimismo ilustrado por dos pasajes, en uno de los cuales describe la atracción magnética, y en el otro las fuerzas capilares: «una fuerza divina es la que te mueve, parecida a la que hay en la piedra que Eurípides llamó magnética, y la mayoría, heráclea. Por cierto, que esta piedra no sólo atrae a los anillos de hierro, sino que mete en ellos una fuerza tal, que pueden hacer lo mismo que la piedra, o sea, atraer otros anillos, de modo que a veces puede formarse una larga cadena de anillos de hierro que penden unos de otros y cuya fuerza les viene de la piedra» [127]. La capilaridad es descrita como sigue: «Qué maravilloso sería... si la sabiduría fuera el tipo de cosa que pudiera fluir de aquellos de nosotros que la rebosan a aquel que carece de ella, mediante nuestro simple contacto, como el agua fluirá por la lana de la copa más llena a la más vacía» [125].

Ambos ejemplos son prueba de una cercanía a la naturaleza y un interés en la observación cualitativa, cuando menos. Mas, pese a todo, la idea básica platónica de que la verdad ha de ser buscada sólo en el mundo de las formas puras, en el reino de las "ideas", le predispuso a creer que el número, y también el estudio de éste, no

tenían valor en la medida en que el número inhiere a la sustancia física del mundo de las sombras. Más aún, en la conversación extraída del *Filebo,* después de que se había mostrado que el elemento científico presente en las artes es la matemática, Sócrates persuade a su amigo de que hay dos tipos de aritmética: «¿Qué es esa ciencia de la contabilidad y la medida utilizada en la arquitectura o el comercio, cuando la comparamos con la filosofía presente en la geometría y el cálculo exacto?». Y después de haber reiterado que las artes pertenecientes a las matemáticas son muy superiores a todas las demás, concluye finalmente: «Las artes y ciencias animadas por la verdadera filosofía, son infinitamente superiores en precisión y certeza a las medidas y números» [124].

La total separación del mundo de las ideas y el mundo físico, implicaba en el sistema de pensamiento platónico una distinción entre los números pitagóricos que inhieren a los objetos concretos, y los números en cuanto tales. Los primeros son —por así decirlo— demasiado impuros y, visto que no hay conexión entre las mediciones físicas y la precisión absoluta del número puro, dichas medidas carecen de sentido. Esta filosofía condujo a Platón, y a todas las generaciones siguientes, educadas en su doctrina, a tratar la experimentación cuantitativa con desdén y a dejar de lado el objetivo de expresar hechos físicos en términos numéricos. Así, la original propuesta de Pitágoras se vio minada y su exigencia concreta de una descripción matemática de la realidad sólo de modo muy imperfecto hallaría respuesta en tiempos antiguos.

En ninguna parte expresa Platón de forma más clara y vehemente su opinión, que en el libro séptimo de la *República:* «Me parece, en efecto, que es evidente para cualquiera que la astronomía obliga al alma a mirar hacia arriba y la conduce de las cosas de aquí a las de allá en lo alto» —dice Glaucón—. «Para cualquiera excepto para mí» —responde Sócrates—, «...no puedo concebir otro estudio que haga que el alma mire hacia arriba que aquel que trata de lo que es y de lo invisible. Pero si alguien intenta instruirse acerca de las cosas sensibles, ya sea mirando hacia arriba con la boca abierta, o hacia abajo con la boca cerrada, afirmo que no ha de aprender nada, pues no obtendrá ciencia de esas cosas... Estos bordados que hay en los cielos lo están sin duda en lo visible y, aunque sean los más bellos y perfectos de su índole, les falta mucho en relación con los verdaderos, así como de los mo-

vimientos con que, según el verdadero número y las verdaderas figuras, se mueven la rapidez real y la lentitud real, en relación la una con la otra y moviendo lo que hay en ellas; movimientos que son aprehensibles por la razón y por el pensamiento, mas no por la vista... Es necesario, entonces, servirse de los bordados que hay en el cielo como ejemplos para el estudio de los otros... Entonces nos serviremos de problemas en astronomía, como lo hicimos en geometría, pero abandonaremos el cielo estrellado, si queremos tratar a la astronomía de forma que transforme de inútil en útil lo que de inteligente hay en el alma por naturaleza...» Después de esto, Sócrates vuelve de nuevo sobre los pitagóricos: «Como sabrás, los estudiosos de la armonía cometen el mismo error que los astrónomos: se pasan el tiempo escuchando acordes y midiendo entre sí sonidos, con lo cual, como los astrónomos, trabajan inútilmente... Te refieres a esos valientes músicos que provocan tormentos a las cuerdas y las torturan estirándolas sobre las clavijas... Pues éstos hacen lo mismo en la armonía que los otros en la astronomía, pues buscan números en los acordes que oyen, pero no se elevan a los problemas ni examinan cuáles son los números armónicos y cuáles no, y por qué razón en cada caso» [128].

En su demoledora ironía a expensas del método científico, Platón ignora el hecho de que, en ciencia, una visión profunda no es suficiente en sí misma para el descubrimiento de la verdad y olvida que sólo esos mismos experimentos de que se burla hicieron posible que los pitagóricos formulasen sus leyes matemáticas. La teoría de las ideas, sin embargo, no consideró que el experimento fuese el medio para alcanzar la meta deseada. La gran popularidad de la filosofía platónica —que tan deplorablemente contribuyó a retrasar la síntesis de método experimental y matemáticas— ha de explicarse en gran medida por la tendencia griega a sobrevalorar la deducción hasta el punto de convertir a la inducción en completamente innecesaria.

Una de las muy escasas excepciones a esa regla, la más grande, fue Arquímedes (287-212 a.C.). Entre sus descubrimientos físico-matemáticos, quizá más importantes sean las leyes de la hidrostática que las de la palanca; las primeras incluyen el uso de una cantidad dimensional, a saber, la densidad, mientras que las últimas no son más que leyes de simple proporción como la ley de las cuerdas vibrantes. Pero en otro aspecto podría decirse que no se hizo ningún

progreso en el período que va de Pitágoras a Arquímedes, pues las leyes naturales que ambos formularon son leyes estáticas en las que el tiempo no aparece de manera explícita. De hecho, aparte de los movimientos de las estrellas, ningún fenómeno dinámico fue puesto en forma matemática por los griegos.

Aristóteles al formular una teoría dinámica general, discute las leyes del movimiento de modo básicamente cualitativo, aunque era consciente de la naturaleza numérica del tiempo, tal como lo vemos en la cuarta parte de la *Física,* donde se reconoce que hay una relación entre tiempo y movimiento: «Hemos de tomar esto como punto de partida y tratar de descubrir —ya que deseamos saber qué es el tiempo— cuál es exactamente su relación con el movimiento. Ahora bien, percibimos tiempo y movimiento unidos, pues incluso aunque esté oscuro y no seamos afectados por el cuerpo, si tiene lugar algún movimiento en nuestra mente, suponemos inmediatamente que ha transcurrido también algún tiempo; y no sólo eso, sino que, además, cuando se piensa que ha transcurrido algo de tiempo, también parece que ha ocurrido algún movimiento simultáneamente. De ahí que el tiempo sea o movimiento o algo perteneciente al movimiento y, puesto que no es movimiento, ha de ser lo otro» [146].

Tras discutir la continuidad del movimiento y los conceptos de 'ahora', 'antes' y 'después', llega a la siguiente conclusión: «El tiempo es exactamente esto, la medida del movimiento respecto a un antes y un después. De ahí que el tiempo no sea movimiento, sino sólo movimiento en tanto que admite una enumeración; prueba de ello es que distinguimos más de menos mediante el número, pero más o menos movimiento gracias al tiempo. El tiempo es, pues, un tipo de número» [147].

Cada medida del tiempo, sea mediante la observación de las estrellas o mediante un reloj hecho por el hombre, depende del movimiento, y Aristóteles subraya la interrelación existente entre esos conceptos: «No sólo medimos el movimiento mediante el tiempo, sino que también medimos el tiempo por el movimiento, ya que ambos se interdefinen. El tiempo marca el movimiento por ser un número, y el movimiento al tiempo» [148].

Pese a todo, Aristóteles nunca se las arregló para formular sus ideas matemáticamente en forma de leyes cuantitativas del movimiento. No entendió del todo el método pitagórico de explicación del

mundo sensorial en términos matemáticos y, casi con seguridad, no habría aceptado la hidrostática de Arquímedes.

Criticó a los discípulos de Pitágoras por haber sido incapaces de explicar el movimiento matemáticamente, pero su crítica muestra que se le había escapado la clave del método pitagórico. A diferencia de su maestro Platón, Aristóteles concedió importancia al mundo sensible, pero, como aquél, no supo ver qué relación había entre el experimento cuantitativo, la formulación matemática y los objetos sensibles: «Pues bien, los llamados pitagóricos recurren a principios y elementos más lejanos que los filósofos (y esto, porque no los tomaron de las cosas sensibles; pues las cosas matemáticas carecen de movimiento, excepto las relativas a la astronomía); sin embargo, todas sus discusiones y estudios se refieren a la Naturaleza; afirman, en efecto, la generación del Cielo, y observan lo que sucede acerca de las partes de éste y de sus afecciones y actividades, y consumen en esto los principios y las causas, como si estuvieran de acuerdo con los demás fisiólogos en que el Ente es todo lo sensible y lo que abarca el llamado Cielo. Pero, como dijimos, exponen las causas y los principios de tal modo que son suficientes para ascender incluso a los entes superiores, y se adaptan a éstos mejor, que a los conceptos relativos a la Naturaleza. Pero de qué modo habrá movimiento, supuesto sólo el Límite y lo Ilimitado, lo Impar y lo Par, no lo dicen; ni cómo es posible que sin movimiento ni cambio haya generación y corrupción o las actividades de los cuerpos que se desplazan por el Cielo. Además, tanto si se les concede como si se demuestra que de estos principios resulta la magnitud, ¿de qué manera, sin embargo, serán leves unos cuerpos y pesados otros? Pues a juzgar por lo que suponen y afirman, no dicen más acerca de los cuerpos matemáticos que acerca de los sensibles. Por eso acerca del Fuego o de la Tierra o de los demás cuerpos semejantes, nada han dicho, porque nada especial dicen —creo yo—, acerca de las cosas sensibles» [30].

Tales afirmaciones muestran que, incluso si los discípulos de Pitágoras hubieran logrado dar una formulación cuantitativa de los fenómenos dinámicos, Aristóteles no la habría aceptado como solución al problema. Lo que quería explicar era, literalmente: «Cómo es posible que haya movimiento», y no «en qué medida tal o cual movimiento dependen de tales o cuales circunstancias» o «qué forma de movimiento ocurre en tales o cuales circunstancias». Cuestiones

de este tipo pueden resolverse por el método pitagórico, mientras que la actitud de Aristóteles no conduce a ninguna parte, ni ofrece esperanza alguna de lograr una investigación fructífera en las ciencias naturales. Más aún, la tendencia generalizadora que tan enormemente ayudaría al pensamiento científico griego antiguo, fue llevada a tales extremos por Aristóteles que acabaría por convertirse en un obstáculo.

El empezó con una generalización, sin haber sometido previamente a un cuidadoso examen cuantitativo los diversos datos sobre los que la generalización se basaba. Su dinámica es un ejemplo característico de la debilidad de su planteamiento y será tratada en otro capítulo, pero con ella no basta para explicar por qué la idea misma de la conexión entre las matemáticas y los fenómenos sensibles escapó al pensamiento griego.

Esa relación llamó también la atención del discípulo y amigo de Aristóteles, Teofrasto, quien formularía lúcidamente el problema al comienzo de su ensayo sobre la metafísica: «¿Cómo y en qué términos deberíamos definir la filosofía de lo primario? Pues, mientras que la filosofía de las cosas primarias está claramente definida y es inmutable, la ciencia de la naturaleza es más compleja y —algunos mantienen— menos ordenada al estar sujeta a todo tipo de cambios. De ahí que aquélla sea asociada con la mente y no con los sentidos, pues la mente es inmóvil e inmutable. En general se la considera superior y más elevada que la ciencia natural. La primera cuestión, por tanto, es si hay una relación y algún tipo de interacción entre los conceptos mentales y los fenómenos naturales; o, si no hay nada de ello, sino algo así como que ambas aun permaneciendo separadas, trabajan juntas para la elucidación de la realidad.

Obvimente es más racional asumir que hay alguna conexión y que el universo no es incoherente, sino que tiene primero y último, esencial y menos esencial, del mismo modo que, por ejemplo, lo que es eterno precede a lo transitorio. Si es así, ¿cuál es la naturaleza de esas cosas y en qué consisten? Pues si los conceptos mentales únicamente pertenecen a las matemáticas —como dicen algunos—, la relación con los sentidos no queda muy clara ni parece que sea capaz de realizar realmente algo. Pues las matemáticas parecerían construidas por nosotros que somos los que ponemos números, formas y proporciones en las cosas que en sí mismas no existen en la naturaleza y, por tanto, no pueden unirse a los objetos naturales a fin de

inducirles orden y movimiento. Incluso el mismo número no puede hacerlo aunque algunos sostengan que es principio primero y regente» [174].

En estas pocas líneas Teofrasto proporcionó la formulación clásica de un complejo de problemas. Puede verse que hacia el final, él, como su maestro Aristóteles, se siente inclinado a dudar de si las matemáticas pueden explicar el movimiento. Pero más aguda es su pregunta general sobre si los fenómenos naturales pueden expresarse en el lenguaje artificial de las matemáticas, pues, ¿cómo explicar lo que es natural mediante lo que no lo es, lo semejante por lo desemejante? Al plantear este problema epistemológico, Teofrasto se situó en la frontera entre la Antigua Grecia y la ciencia moderna. El creía —como vemos en las primeras frases— que hay una interacción entre la mente y el mundo sensible y, más aún, creía que el mundo «no es incoherente», es decir, que es un cosmos bien ordenado. Sin embargo, se siente perplejo ante el contraste existente entre la simplicidad y el orden de la mente y la complejidad y ramificación que se encuentra en la mayoría de los fenómenos naturales. ¿Cómo puede la mente controlarlos a todos? Hoy, podríamos quizá dar reposo a la mente de Teofrasto, respondiéndole con la famosa metáfora utilizada por su maestro Platón. En el *Timeo,* éste describe cómo el demiurgo forma el cosmos a partir de la materia informe primigenia. El creador simboliza ahí a la Mente, mientras que a la materia prima gobernada por la mente, Platón le concede una cualidad que denomina "necesidad" y que nada tiene que ver con el concepto de necesidad en la filosofía griega, donde aparece enteramente conectado con el de causalidad. "Necesidad" denota en el *Timeo* la resistencia de la materia primigenia al orden y a la forma: «Ahora bien, nuestro discurso ha establecido las obras producidas por el arte de la Razón, pero no debemos poner junto a ellas las cosas producidas por la Necesidad. Pues la generación de este universo es el resultado de la acción combinada de Necesidad y Razón. La Razón gobierna por encima de la Necesidad persuadiéndole para guiar la mayor parte de las cosas que tienden al máximo bien. De este modo, y de acuerdo con este principio, el universo fue arreglado en el origen por el triunfo de la persuasión razonable sobre la Necesidad» [131].

Esta metáfora describe de forma adecuada la aprehensión matemática de la naturaleza tal como la vemos, por ejemplo, en la his-

toria de la física matemática a lo largo de los últimos trescientos años. Ese proceso de interacción prosigue al infinito, pues Razón y Necesidad coexisten siempre, independientemente de cuánto extienda su radio de acción la primera. Esa expansión se logra —por así decirlo— cautivando, pues la Necesidad ha de ser persuadida poco a poco para que obedezca a la Razón.

Aunque la descripción matemática del universo tiene una función científica, su logro es imposible sin la inspirada imaginación del científico creativo. Paso a paso el ámbito de explicación impone lentamente su pauta sobre el caos de lo inexplicable. La conquista fue iniciada por la mecánica, después la termodinámica redujo a orden otra esfera de fenómenos y la obra fue proseguida por el electromagnetismo. Ahora, la teoría cuántica nos ha abierto nuevos horizontes. Cierto es que tras cada conquista, la Necesidad rebrota en otro campo, pero eso no nos hace rendirnos ni desmayar. Hoy ya no dudamos de que es posible «guiar la mayor parte de las cosas que tienden al máximo bien».

Capítulo III
CIELO Y TIERRA

«¿Conoces las leyes de los Cielos? ¿Aplicas su fuero en la Tierra?».

—Job 38.33

La contribución griega a la astronomía —la más antigua de las ciencias— fue especialmente notoria en los siguientes tres ámbitos: *a)* la mejora de las mediciones astronómicas; *b)* el desarrollo de modelos de explicación geométricos para los movimientos estelares; *c)* el cálculo de las dimensiones cósmicas. En el primero, los griegos meramente continuaron a partir del punto alcanzado por egipcios y babilonios, pero en los otros dos ámbitos, abrieron un nuevo capítulo de la historia de la astronomía que conduciría a avances más ambiciosos.

El mejor criterio del progreso realizado en las observaciones astronómicas durante el período griego es el grado de exactitud alcanzado en la determinación de la duración del año. El año solar de 365 días fue conocido por los griegos a finales del siglo VI a.C. a partir de fuentes egipcias, del mismo modo que obtuvieron su conocimiento de la duración mensual de los babilonios (éstos habían estudiado desde antiguo la conexión existente entre los ciclos solares y lunares). Los astrónomos griegos del siglo V a.C. redujeron las antiguas aproximaciones mediante observaciones de los solsticios en los días más corto y más largo del año. En el 432 a.C. Metón de Atenas estimó la duración del año en 365 días, 6 horas, 18 minutos y 56 segundos, cálculo que sólo sobrepasa en 30 minutos y 10 segundos el valor correcto.

En los trescientos años siguientes ese margen de error fue reducido paulatinamente hasta que Hiparco —cuyas observaciones concluyeron hacia el 130 a.C.— llegó a un valor de 365 días, 5 horas, 55 minutos y 12 segundos, lo que supone un error de sólo 6 minutos y 26 segundos. Así pues, la exactitud era de una cienmilésima y aún más ajustado fue el cálculo de la duración media del mes conocida en tiempos de Hiparco.

En el ciclo de Metón, 19 años solares (que incluían 7 años bisiestos) equivalían a 235 meses lunares, mientras que en ciclo de Hiparco 304 años (incluyendo 112 años bisiestos) equivalían a 3760 meses lunares. Este grado de exactitud —que muestra claramente la paciente perseverancia de los astrónomos griegos en sus observaciones de los cielos— marcó un estándar para los especialistas medievales y modernos de ese campo.

Si tenemos en cuenta la escasez de mediciones precisas hechas por los griegos en las otras ciencias físicas, no podemos dejar de preguntarnos por qué la astronomía fue una excepción. Frecuentemente se subrayan los factores prácticos, y especialmente los económicos, que condujeron al desarrollo de la investigación astronómica. Así, la importancia de las estrellas para la navegación suele mencionarse en la poesía antigua y hay evidencia literaria procedente de tiempos remotos, sobre la conexión entre la agricultura y el conocimiento de los cielos. Hesíodo, por ejemplo, aconsejó a los granjeros sobre las épocas de siembra, siega y vendimia por medio de las alturas de ciertas constelaciones después de la caída del sol o antes del amanecer. Del mismo modo, el campesino egipcio había aprendido desde tiempos inmemoriales a calcular mediante las estrellas el comienzo de la inundación del Nilo. Pero más importantes que estas consideraciones de tipo práctico, fueron factores irracionales cuyas raíces se hunden en tiempos remotos y que están conectados con la historia de la astrología. Especialmente digno de mención a este respecto es el efecto que el carácter cíclico de los fenómenos celestes produjo sobre el hombre. Los cambios en las fases de la Luna y su periodicidad, el avance del Sol a lo largo del cinturón zodiacal con los cambios previsibles de estación, los complicados movimientos de los planetas que también poseen una regularidad cíclica y, sobre todo, la periodicidad de veinticuatro horas de toda la disposición de la cúpula celeste, con las alternancias del día y la noche que le acompañan, todo este vasto cuadro de ciclos eternamente recurren-

tes, despertó la conciencia del hombre antiguo al enorme contraste existente entre la firme certeza de los cielos y la incertidumbre de la vida humana sobre la Tierra.

«¿Sacarás tú a su tiempo las constelaciones de los cielos,
O guiarás a la Osa Mayor con sus hijos?
¿Conoces las leyes de los cielos?
¿Aplicas su fuero en la Tierra?»

(Job 38.32-33)

De los muchos ejemplos que abundan en la literatura clásica nos contentaremos con los versos de una de las más bellas odas de Horacio (IV. 7) en la traducción de Bonifacio Chamorro:

Todo así se repone
en la esfera celeste;
mas si caemos nosotros en la mansión que habitan
Eneas reverente
y el rico Tulo y Anco,
polvo no más y sombra perpetua nos envuelve.

En ellos encontramos una contraposición doble: la vida humana es única y sólo puede ser vivida una vez, mientras que en los cielos se da una recurrencia sin fin; el individuo es un juguete de la suerte, mientras las estrellas obedecen una ley de maravillosa constancia. Este contraste es la fuente de la fascinación religiosa que mantuvo a la mente humana esclavizada desde los tiempos más antiguos a los cuerpos celestes y que se expresó como mera divinización de los astros o, de forma racionalizada, como una llamada a seguir los más mínimos detalles de tales manifestaciones de precisión y regularidad. Al elemento irracional se añadió el objetivo práctico de fijar las fiestas religiosas mediante un calendario. En tiempos modernos, el ejemplo mejor conocido es el apoyo oficial concedido por la Iglesia Católica a las observaciones astronómicas que condujeron a la introducción del calendario Gregoriano en 1582.

La unión de ciencia y religión en el enfoque dado a los fenómenos de los cielos se vio alterada por el método científico, intensamente racional, introducido por la escuela milesia en los primeros días de la ciencia griega. Ya hemos visto que Anaximandro explicó las revoluciones del Sol y la Luna con la ayuda de modelos mecánicos y, más aún, Anaxágoras dijo que el Sol y las estrellas son rocas

ígneas, atribuyéndoseles opiniones similares a Leucipo y Demócrito, los fundadores de la escuela atomista, amén de que algunas de las conjeturas de Empédocles sobre los fenómenos celestes tienen también un carácter estrictamente físico. Pero incluso en esa época la noción religiosa no estaba completamente excluida del pensamiento científico y, así, la sublimación científica de la divinización astral aparece con renovada firmeza en la escuela pitagórica, en la que las tendencias místicas y religiosas prevalecieron sobre, y se combinaron con, el punto de vista científico. Del médico pitagórico de comienzos del siglo v a.C., Alcmeón, Aristóteles dijo en el curso de su discusión sobre la naturaleza del alma: «Alcmeón también parece haber mantenido un punto de vista similar sobre el alma; él dice que es inmortal porque asemeja a los «inmortales» y que dicha inmortalidad le pertenece en virtud de su incesante movimiento, pues todas las «cosas divinas», la Luna, el Sol y los planetas, así como todos los cielos, están en perpetuo movimiento» [31]. El movimiento cíclico de los cuerpos celestes exhibe esa combinación de inmortalidad y continuidad en su forma más pura, dando prueba activa de la divinidad de las estrellas.

Esta ligazón del alma y las estrellas que se encuentra también en una fuente posterior («Alcmeón de Crotona consideraba dioses a las estrellas dado que tienen alma» [32]), tuvo una peculiar secuela en la doctrina de Platón. Su famosa prueba de la inmortalidad del alma comienza con la siguiente afirmación: «Toda alma es inmortal —porque aquello que se mueve perpetuamente es inmortal» [126]— y su punto de vista sobre la divinidad de las estrellas halló su más clásica expresión en el *Epinomis*. En esta culminación de la sublimación científica de la divinización astral siguiendo líneas pitagóricas, podemos asimismo encontrar algunos elementos de los cimientos sobre los que fue construida la dinámica de Aristóteles: «Así, pues, los hombres deberían ver una prueba de la inteligencia de los astros y de la totalidad de sus recorridos en el hecho de que siempre reproducen los mismos movimientos y esto porque repiten desde un tiempo prodigiosamente largo unos actos que ellos han decidido ya en otra época, en lugar de cambiar de opinión sin norma alguna, de variar sin cesar sus movimientos y tener, en consecuencia, revoluciones errantes y desordenadas. La mayoría de nosotros ha creído sobre el particular precisamente lo contrario, a saber, que haciendo siempre los mismos movimientos con toda exactitud no

tenían alma, y la multitud se ha ido en pos de los necios e insensatos hasta el punto de considerar lo humano como inteligente y vivo, so pretexto de que ello se mueve, y lo divino, como desprovisto de inteligencia, so pretexto de que se mantiene siempre en los mismos caminos. Pero estaba permitido al hombre que prefiere lo más bello, lo mejor, lo verdaderamente aceptable, sentar que hay que considerar inteligente, por esa misma razón, lo que siempre se conduce pot unas mismas normas, de idéntica manera y pot unos mismos motivos y que está en la misma naturaleza de los astros el ser más bella a la vista y, ejecutando una marcha y una danza coral que es la más bella y más maravillosa de entre todas las danzas, el proveer a la necesidad de todos los seres. Ahora, para afirmar que está justificado nuestro atribuirles un alma, consideremos primeramente sus dimensiones. En realidad los astros no son tan pequeños como nos parecen, antes bien, cada uno de ellos tiene una magnitud prodigiosa: ésta es una cosa digna de crédito ya que se prueba con demostraciones satisfactorias. Es, en efecto, posible representarse correctamente el volumen del Sol como superior al volumen de la Tierra y, de manera general, todos los astros que se mueven tienen una magnitud maravillosa. Imaginemos, pues, de qué manera iba a ser posible que una fuerza natural imprimiese un movimiento circular a una masa semejante, en un tiempo siempre idéntico al que en la actualidad exige esta revolución» [136].

Nosotros, que pertenecemos a la era de la máquina, hemos crecido habituados a una asociación de ideas enteramente diferente. La esencia de cada máquina consiste en repetir el mismo movimiento exactamente, de modo que usamos la palabra «automático» para indicar, precisamente, un movimiento carente de razón, un movimiento «desalmado». Pero en la era de la artesanía y las técnicas manuales, la reproducción exacta de un modelo o forma era considerada un signo de la inspiración divina del artista.

Fue la influencia educativa de Platón la que decidió a favor del punto de vista de que las estrellas son divinas, y en contra de la tendencia estrictamente fisicista del período presocrático. Platón mismo discutía explícitamente las opiniones de Anaxágoras en el libro décimo de *Las Leyes*: «Cuando tú y yo tratamos de probar la existencia de dioses señalando a esos mismos objetos (el Sol, la Luna, las estrellas y la Tierra) como ejemplos de deidad y divinidad, la gente que ha sido convertida por esos científicos afirmará que tales

cosas son simplemente tierra y roca, incapaces de ocuparse de los asuntos humanos» [132].

En el libro duodécimo Platón repasa sus puntos de vista sobre la existencia de los dioses y encuentra dos pruebas: la inmortalidad del alma como resultado del movimiento perpetuo, y el movimiento de los cielos. Se pregunta si es concebible que «... aquellos que estudian esos objetos en astronomía y las otras artes necesariamente ligadas a ésta se conviertan en ateos al observar —como ellos suponen— que todas las cosas nacen de fuerzas necesarias y no por la energía mental de la voluntad que pretende la consecución del bien» [135]. Su respuesta es que: «La situación en el presente es exactamente la opuesta a la que era cuando aquellos que estudiaban esos objetos los consideraban desalmados. Mas incluso entonces eran objetos de admiración y la convicción que es actualmente sostenida es la que ha sido supuesta por todos los que los han estudiado con exactitud, a saber, que si carecieran de alma y, en consecuencia, no tuvieran razón, nunca habrían podido emplear con tanta precisión cálculos tan admirables» [135].

Esa polémica va también dirigida contra Anaxágoras y el modo físico de mirar los cielos, como se muestra en el pasaje siguiente, en el que se reitera que todo lo que se mueve en los cielos les parece estar lleno de piedras, tierra y muchos otros cuerpos carentes de alma que proporcionarían las causas de todo el cosmos. Y al final aparece el elemento pitagórico en la filosofía de Platón: «Además, como hemos afirmado con frecuencia, debe también captar la razón que controla cuanto existe entre los astros... y debe observar también la conexión de ello con la teoría musical... y debe ser capaz de proporcionar una explicación racional a todo cuanto la admita» [135].

Hemos citado varias veces a Platón porque fue su opinión la que decidió esta importante disputa. Una vez que Aristóteles la aceptó y le dio una base física más amplia, la suerte de la ciencia griega estaba echada y la división entre cielo y tierra pasó a ser una parte integrante de la física antigua y el cosmos griego, situación que seguiría siendo la misma hasta Galileo. Incluso Epicuro, que intentó seguir los pasos de Anaxágoras y Demócrito y, por tanto, se opuso a los puntos de vista platónicos sobre la divinidad de las estrellas, mantuvo esa separación aunque con la intención opuesta. Puesto que el punto de vista aceptado era que el alma y la inteli-

gencia de las estrellas se revelaba en su conformidad a una ley y en la absoluta regularidad de sus movimientos, Epicuro trató de socavar la teoría platónica planteando de forma directa e indirecta ciertas dudas acerca de la existencia en los fenómenos celestes de una tal conformidad a ley, al tiempo que mantenía que los fenómenos terrestres obedecen estrictamente a leyes de causalidad. La ciencia moderna nació en el siglo XVII cuando se mostró que las leyes de la mecánica terrestre se satisfacían en el movimiento de los planetas o, en otras palabras, nació con el derrumbamiento de la barrera que separaba los cielos de la tierra. Esta es la razón por la que la historia de tal separación es importante a la hora de entender el cosmos como lo hicieron los griegos; tendremos que volver sobre ello en varias ocasiones, sobre todo al tratar de Aristóteles, que fue quien dio a esa separación sanción científica y cuya enorme autoridad intelectual contribuyó a preservarla durante cerca de 2000 años; pero también cuando tratemos a Epicuro quien, al situarse en el extremo opuesto, contribuyó a su vigencia.

El más alto grado de exactitud en las observaciones astronómicas fue el alcanzado por el más grande de los astrónomos griegos, Hiparco (*c.* 190-120 a.C.). Algunas de sus observaciones fueron realizadas en Rodas y Alejandría y sus hallazgos formaron la base del compendio de Ptolomeo alrededor de trescientos años más tarde. Hiparco hizo un uso sistemático de la trigonometría en sus cálculos y a tal propósito construyó una «Tabla de cuerdas», dando valores numéricos a varios arcos y ángulos de un círculo. Junto a ello, mejoró algunos de los instrumentos de medida e hizo asimismo un catálogo de estrellas que contenía más de ochocientas determinando, mediante coordenadas, sus posiciones. Esa lista no ha llegado hasta nosotros y, lo que es peor, de todos sus escritos sólo quedan unos pocos fragmentos citados en las obras de astrónomos posteriores. Plinio le elogiaba en su *Historia Natural* en los siguientes términos: «Hiparco, que nunca será alabado en demasía... descubrió una nueva estrella aparecida en su tiempo. Debido a su movimiento el día en que hizo aparición, empezó a preguntarse si lo mismo no sucedería con frecuencia y si las estrellas que se consideran fijas no podrían también moverse. Hizo algo que resultaría admirable incluso en un dios, contó las estrellas y constelaciones para las futuras generaciones y les dio a todas nombres. A este fin diseñó instrumentos mediante los cuales asignó una posición y ta-



maño a cada estrella y como resultado de ello es fácil distinguir no sólo si las estrellas están muriendo o naciendo, sino además si se mueven de su lugar y si su luz está aumentando o decreciendo. El dejó los cielos como herencia a todos cuantos quisieran tomar posesión de ellos» [238].

El mayor logro de Hiparco —que le aseguraría un puesto de honor en la historia de la astronomía— fue su descubrimiento de la precesión de los equinoccios. Lo explicaremos brevemente. El eje de la Tierra no es perpendicular al plano de su órbita, sino que está inclinado formando un ángulo de 66.5°, con lo que el plano del Ecuador estará inclinado respecto al plano de su órbita en un ángulo de 23.5°. Sabido que la Tierra gira diariamente sobre su eje, es fácil determinar la dirección de ese eje respecto a las estrellas, así como proyectar el Ecuador terrestre como un círculo en el cielo, de modo que la revolución anual de la Tierra aparecerá en el cielo como un movimiento del Sol a lo largo de la órbita de la eclíptica, contra el cinturón del zodíaco. Así, esta órbita corta la proyección del Ecuador terrestre con un ángulo de inclinación de 23.5° en dos puntos que serán los puntos equinocciales primaveral y otoñal. De acuerdo con las leyes de la mecánica, la Tierra al no ser una esfera perfecta, se comporta como una peonza: su eje no mantiene una única dirección en el espacio sino que gira muy lentamente sobre un eje que pasa por su centro y es vertical al plano de su órbita.

En función de su movimiento a modo de peonza, la posición de sus puntos equinocciales en el cielo, cambia; ese es el movimiento llamado de precesión de los equinocios. Puesto que ésta completa un círculo en unos 26.000 años aproximadamente, encontramos un movimiento que implica el desplazamiento anual en 50'' de arco de un determinado punto del cielo, con lo cual podemos hacernos una idea de la exactitud de las medidas de Hiparco.

El llegó a su resultado comparando sus propias mediciones de la posición de las estrellas fijas respecto a los puntos equinocciales, con las tomadas por los astrónomos alejandrinos durante los ciento cincuenta —o más— años anteriores. Hoy sabemos que el grado de exactitud alcanzado por él en la determinación de la precesión fue de más del 15 por 100, lo que explica las palabras de Ptolomeo sobre ese descubrimiento: «Que la esfera de las estrellas fijas tiene un movimiento por sí misma en el sentido opuesto al de la revolución de todo el universo, es decir, en la dirección este del gran

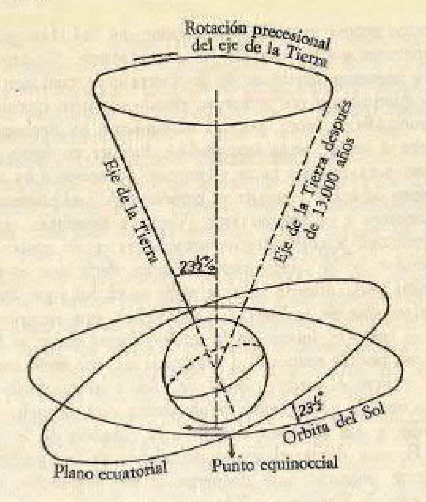


FIG. 2.—*Precesión de los equinoccios.*

círculo descrito a lo largo de los polos del Ecuador y el círculo zodiacal nos resulta claro, especialmente por el hecho de que algunas estrellas no han mantenido la misma distancia a los puntos solsticiales y equinociales en épocas anteriores y en nuestro propio tiempo, sino que conforme pasa el tiempo aumentan continuamente esa distancia medida en dirección este desde los puntos contra los cuales estaban ambos... Esta parece haber sido la idea de Hiparco a juzgar por lo que dice en su obra *Sobre la duración del año*: "Si por esta razón los solsticios y equinoccios han cambiado su posición en el orden inverso al de los signos en no menos de 1/100° en un año, su desplazamiento en trescientos años debe haber sido de no menos de 3°"» [239].

Volvamos ahora a la enorme contribución original de los griegos a la astronomía: la construcción de modelos geométricos para representar los movimientos planetarios. Desde Copérnico es generalmente conocido que tales movimientos nos parecen ser como lo hacen

debido a nuestra propia revolución alrededor del Sol. Los planetas con órbitas mayores que la nuestra, es decir, Marte, Júpiter y Saturno, parecen moverse alrededor de la Tierra cada cual con curso propio y con movimiento no uniforme, siendo el curso circular del planeta interrumpido, a veces, por un movimiento en tirabuzón (el planeta decelera y vuelve atrás moviéndose durante un lapso en dirección opuesta, para después parar y regresar de nuevo a su avance respecto al punto de inicio y seguir su trayectoria). Los planetas que están entre nosotros y el Sol, es decir, Venus y Mercurio, también realizan movimientos retrogradatorios semejantes en su aparente revolución alrededor de la Tierra, pero debemos decir que el centro de esa oscilación hacia delante y hacia atrás es el Sol (que también parece rotar alrededor de la Tierra), y así Venus, por ejemplo, aparece unas veces como el lucero de la tarde y otras como el lucero del alba. ¿Cómo podría reducirse a un único sistema todo ese movimiento que incluye el círculo anual del Sol y el mensual de la Luna? Por encima de todos esos movimientos está el ciclo diario de todo el cielo y sus cohortes debido a la rotación de la Tierra sobre su eje. Es aquí donde el genio geométrico de los griegos encontró el terreno abonado para desplegarse. La inspiración inicial provino de la idea de Pitágoras y Platón de que la esfera y el círculo son las figuras geométricas más perfectas y, por tanto, la base de cada uno de los movimientos celestes.

La primera solución al problema la proporcionó Eudoxo de Cnido (*c.* 409-356 a.C.) influido por Platón: «Y, como Eudemo nos dice en el libro segundo de su *Historia Astronómica* —y Sosígenes también, apoyándose en éste— Eudoxo de Cnido fue el primero de los griegos que se ocupó de una hipótesis de este tipo tras haber planteado Platón —como dice Sosígenes— como un problema a todos los estudiosos del tema el hallar cuáles son los movimientos uniformes y ordenados por cuya suposición pueden salvarse los fenómenos relacionados con los movimientos de los planetas» [115].

«Salvar los fenómenos» es una expresión griega característica para la explicación racional de los fenómenos físicos en general, y de los astronómicos en particular. El método de Eudoxo es la famosa teoría de las esferas concéntricas que sería luego aceptada por Aristóteles y a través de él pasaría a integrar la astronomía medieval. Las esferas concéntricas tienen a la Tierra como centro común y giran a velocidades constantes —que varían para cada una de ellas—,

alrededor de ejes diferentes y en diferentes direcciones. Todas sus velocidades y direcciones están coordinadas de tal manera que el movimiento resultante coincida con el movimiento empíricamente observable del planeta en cuestión al que se supone ligado al ecuador de la esfera interior.

Citaremos ahora algunas afirmaciones procedentes de la detallada descripción que Aristóteles hiciera de la Teoría de Eudoxo en su *Metafísica*: «Pues bien, Eudoxo puso la traslación del Sol y de la Luna cada una en tres esferas, la primera de las cuales era la de los astros fijos; la segunda, la que sigue el círculo que pasa por el medio del zodíaco, y la tercera, la que sigue un círculo oblicuo a lo ancho del zodíaco (y la oblicuidad del círculo en que gira la Luna alcanza una latitud mayor que la del que sigue el Sol); y puso la de los planetas en cuatro esferas para cada uno, y dijo que la primera y segunda de éstas es la misma que aquéllas (pues la de los astros fijos es la que las mueva a todas, y la que está situada bajo ella y tiene su traslación por el medio del zodíaco es común a todos), mientras que los polos de todos los de la tercera están en el círculo que pasa por el medio del zodíaco, y la traslación de la cuarta sigue el círculo oblicuo en relación con el medio de la tercera; y que los polos de la tercera esfera son distintos para cada uno de los demás, pero los de Venus y Mercurio son los mismos» [116].

El desarrollo de la teoría de las esferas es característico del desarrollo de cualquier hipótesis científica en al menos dos aspectos. El primero es que se acumularon nuevos hechos o se incrementó la exactitud de la información ya poseída, mediante nuevas observaciones; después se hizo sentir la necesidad de ajustar el modelo antiguo a la nueva realidad. Normalmente esto implica, en primer lugar, la construcción de un modelo más complejo y finalmente el abandono completo de aquél reemplazado por otro basado en una idea nueva y más simple, en términos científicos, que la primera. El modelo de Eudoxo fue "mejorado" —es decir, complejicizado— por Calipo (370-300 a.C.), quien añadió más esferas a las 26 originales: dos para el Sol, dos para la Luna y una para cada uno de los planetas Mercurio, Venus y Marte. Con ello, lo que se ganó en exactitud se perdió por la complejidad que representaba.

Hablando en términos generales, un modelo se introduce como hipótesis *ad hoc* para hacer posible una primera descripción com-

pleta del fenómeno que va a examinarse. Eudoxo, así, inventó sus esferas únicamente como representaciones geométricas que proporcionaban una solución limpia al problema planteado por Platón; aparentemente pues, no tuvo la intención de convertir ese modelo estrictamente geométrico que había sido concebido como una herramienta matemática, en una representación de la realidad física. Otras veces, sin embargo, el modelo es simplemente una reproducción de la realidad tal como nuestra mente se la representa. El planetario, por ejemplo, con su representación de los planetas mediante pequeñas bolas que giran alrededor del Sol, es un modelo en miniatura de indudable realidad física. Por el contrario, estamos lejos de sentirnos ciertos acerca de algún modelo mecánico de las partículas del núcleo del átomo y los consideramos todos nada más que como hipótesis *ad hoc* dependientes de una ulterior aclaración de los problemas nucleares.

Los modelos de este tipo tienen, no obstante, una peligrosa tendencia a cobrar vida por sí mismos y convertirse en independientes. Su propósito originario era ayudar a la teoría en una cierta etapa de su desarrollo, pero una vez atrincherados en la conciencia científica de la época, se convierten en obstáculos para cualquier avance, ya que tienden a ser identificados con la realidad y a ser considerados incluso más importantes que los fundamentos de la teoría en cuyo beneficio fueron inventados. Eso es lo que ocurrió con el modelo de las esferas de Eudoxo cuando Aristóteles se adueñó de él y transformó las esferas en cuerpos físicos, en esferas materiales concéntricas unidas entre sí, lo que sabemos por un pasaje en la *Metafísica* que introduce su descripción de la teoría de Eudoxo. y por las mejoras que él mismo hizo a ésta. Aristóteles argumenta que, puesto que las estrellas son sustancias, la causa de su movimiento debe también ser una sustancia, puesto que es anterior en el tiempo: «Así, pues, está claro que son sustancias y que una de ellas es primera, y otra segunda, según el mismo orden de las traslaciones de los astros.

Para averiguar cuántas son las traslaciones hay que acudir a la más afín a la Filosofía entre las ciencias matemáticas, es decir a la Astronomía; ésta, en efecto, estudia una sustancia sensible pero eterna, mientras que las otras no estudian ninguna sustancia, por ejemplo, la Aritmética y la Geometría» [171].

De este modo la teoría de las esferas concéntricas fue elevada por Aristóteles. de ser una mera ayuda geométrica, al nivel de una

realidad física, una reproducción de hecho real del cosmos. Apoyada en la autoridad del concepto aristotélico de sustancia y causa, estaba destinada a conservar durante los ochocientos años que siguieron a la muerte de Aristóteles, un lugar incontestable en la representación del cosmos. Aristóteles modificó el modelo de Eudoxo, como Calipo lo hiciera, sólo que en su caso las modificaciones no estaban llamadas a hacer corresponder el modelo más exactamente con los hechos observados, sino a armonizarlo con su propia teoría.

Eudoxo había atribuido a cada planeta un sistema propio de esferas, pero en modo alguno había unido entre sí las diferentes esferas. No necesitaba ninguna conexión de ese tipo, ya que la única finalidad de su modelo era proporcionar un esquema geométrico de los complejos movimientos planetarios. Aristóteles, por el contrario, no podía contentarse con esto, dado que su objetivo era hallar las conexiones existentes entre todos los grupos de esferas, construyendo así un sistema único y uniforme con todas ellas que presentara a todos los cuerpos celestes —desde las estrellas fijas a la Luna y la Tierra central— como una sola unidad orgánica. A fin de unir cada conjunto de esferas con el siguiente, Aristóteles se vio obligado a introducir más y más esferas nuevas entre las ya existentes y con el solo objeto de integrar en un solo sistema todas las uniones. El número de esferas conectoras sumaba 22, lo que suponía que el modelo totalizara 55 esferas. El resultado de dar prioridad al modelo sobre los hechos y de transformarlo en una sustancia real, fue complicar la imagen al extremo de que no quedase ni huella de la intención simplificadora inicial.

El modelo de las esferas concéntricas continuó dominando la imagen popular del cosmos a lo largo del período que llega hasta Copérnico; sin embargo, los astrónomos griegos, ya desde el siglo II a.C. en adelante, tenían la sensación de que no era suficientemente flexible como para asumir la creciente exactitud observacional cuyo progreso mostraba que las velocidades del Sol y los planetas no eran uniformes y que ese hecho no podría posiblemente ser explicado bajo la asunción de que la Tierra era el centro de sus movimientos. Pese a todo, prácticamente todos los astrónomos se mantuvieron fieles a la teoría geocéntrica; simplemente, la contradicción fue resuelta asumiendo que las estrellas realmente se movían en círculos (siguiendo la inicial teoría pitagórico-platónica) y que esos círculos inscribían la Tierra, como la teoría geocéntrica requería, es

decir, los círculos eran excéntricos. Antes de Kepler a nadie se le había ocurrido imaginar las trayectorias de los planetas como elipses, a pesar de que la geometría de secciones cónicas —incluyendo la elipse— había sido desarrollada en Grecia desde la segunda mitad del siglo IV a.C. y alcanzó su cumbre en el siglo II con la obra de Apolonio de Perga. El círculo fue una parte tan inseparable del cosmos griego como la línea recta lo sería luego del cosmos newtoniano.

Junto a la teoría de los círculos excéntricos, se hizo otro intento para explicar los movimientos retrógrados de los planetas en el curso de su revolución alrededor de la Tierra y esta segunda teoría desplazó al modelo de concéntricas en el mundo científico. Se trata de la famosa teoría de los epiciclos. Aunque su introductor es desconocido, Hiparco ya la usó en combinación con la teoría de la excéntrica y Ptolomeo incluyó en su gran obra astronómica la que fue su formulación definitiva. Hay razones para pensar que Apolonio de Perga ya había desarrollado la teoría epicíclica que, como su rival, descomponía el movimiento del planeta en círculos. De acuerdo con ella, el planeta giraba en un círculo secundario (epiciclo) alrededor de un centro geométrico que, a su vez, giraba en un círculo primario alrededor de la Tierra o de un centro cercano a ésta (si el movimiento es excéntrico). Así, para un observador terrestre, la combinación de la revolución del planeta en su círculo secundario con el avance del centro de éste a lo largo del perímetro del círculo primario, aparece como el movimiento «epicíclico» característico descrito en las figuras.

Hoy, tras Copérnico, sabemos que el movimiento epicíclico refleja de hecho la revolución anual de la Tierra alrededor del Sol; si ésta estuviese quieta, nos parecería que los otros planetas se mueven en simples círculos o elipses. Ya hemos señalado que por razones geométricas el fenómeno aparece más simple para los movimientos de los dos planetas «interiores», Mercurio y Venus, que giran entre nosotros y el Sol. El centro de su epiciclo es idéntico al centro del mismo Sol y el descubrimiento de ese hecho fue la primera brecha seria abierta en la teoría geocéntrica. Heráclides de Ponto (388-315 a.C.), un discípulo de Platón, enseñaba que Mercurio y Venus giran alrededor del Sol mientras éste, como todos los demás planetas, giraba en torno a la Tierra. Esa información la hemos obtenido de fuentes posteriores de los siglos IV y V de nuestra era: «Final-

mente, Heráclides de Ponto, al describir el círculo de Venus, así como el del Sol, y dar a los dos un centro y un medio, mostró que Venus unas veces está por encima y otras por debajo del Sol. Por lo que dice que la posición del Sol, la Luna, Venus y todos los planetas —donde quiera que estén— viene definida por una línea que pasa por el centro de la Tierra y va hasta el cuerpo celeste del que

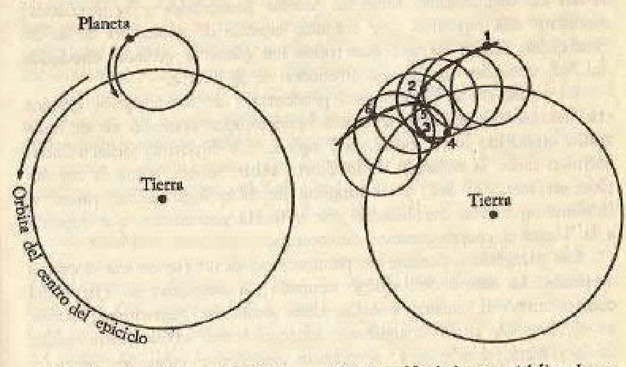


FIG. 3.—*Movimiento epicíclico.*

FIG. 4.—*Movimiento epicíclico de un planeta, visto desde la Tierra.*

se trate. Por tanto, habrá una recta dibujada desde el centro de la Tierra mostrando la posición del Sol, e igualmente otras dos rectas, a derecha e izquierda, que distarán de ella 50° y 100°, respectivamente; mostrando la más cercana al este, la posición de Venus o Estrella Matutina cuando está más alejado del Sol y más cercano a las regiones orientales —una posición en la que recibe entonces el nombre de Estrella Vespertina, porque aparece hacia el este por la tarde tras la puesta del Sol» [117].

La segunda fuente observa más brevemente: «Aunque se vea a Venus y Mercurio ascender y ponerse diariamente, sus órbitas no rodean la Tierra totalmente sino que circulan alrededor del Sol en un movimiento más libre. De hecho, tienen al Sol por centro de sus círculos, de tal modo que a veces son transportados sobre él y otras por debajo de él y más cercanos a la Tierra, desviándose Venus en

un signo y medio del Sol» [118]. Sobre estos testimonios, Heráclides de Ponto podría ser considerado el fundador de la teoría epicíclica que ocupó el terreno, aunque sin derrocar completamente a la teoría de las esferas concéntricas, hasta la publicación del libro de Copérnico en 1543. Incluso entonces, no pasó al limbo; como es bien sabido, Tycho Brahe a finales del siglo XVI todavía intentó alcanzar un compromiso entre las teorías geocéntrica y heliocéntrica, mediante una hipótesis que era una especie de extensión de la de Heráclides. Brahe supuso que todos los planetas giraban alrededor del Sol, mientras éste giraba alrededor de la Tierra.

El poder de la imaginación geocéntrica de los antiguos griegos era tan asombroso, que la teoría heliocéntrica apareció en el horizonte científico hace todos esos siglos. Las hipótesis desarrolladas incluían tanto la rotación de la Tierra sobre su eje, como la revolución en torno al Sol, pero ninguna de ellas logró echar raíces y, finalmente, fueron desplazadas por la teoría geocéntrica que suponía a la Tierra el centro inmóvil del cosmos.

Los pitagóricos fueron los primeros en desviarse de esa doctrina aceptada. La teoría del «fuego central», al desplazar la Tierra del centro, abrió el camino a otras ideas similares. Aristóteles escribe en su libro *De caelo* lo siguiente sobre el tema: «Nos queda hablar de la Tierra, dónde está, si debería clasificarse entre los seres en reposo o entre aquellos en movimiento, y de su forma. Con respecto a su posición, hay opiniones divergentes. La mayoría de quienes mantienen que todo el universo es finito dice que descansa en el centro, pero esto es contradicho por la escuela italiana llamada de los pitagóricos. Estos afirman que el centro está ocupado por el fuego y que la Tierra es una de las estrellas, creando el día y la noche conforme viaja en un círculo alrededor del centro. Además, inventan otra Tierra, opuesta a la nuestra, a la que dan el nombre de anti-Tierra. En lugar de concordar sus razonamientos y explicaciones con los hechos observados, constriñen los hechos intentando hacerlos encajar en el marco de ciertos razonamientos y opiniones con los que se esfuerzan en hacer corresponder su imagen del mundo. También pueden encontrarse muchos otros que comparten la opinión de que no es necesario atribuir a la Tierra la región central, y tampoco ellos basan su convicción en hechos observados, sino más bien en razonamientos abstractos. Así, el ser más noble habrá de pertenecer a la región más noble. Puesto que el fuego es más noble que la

tierra y el límite es más noble que los lugares intermedios, así, basando sus razonamientos sobre esos fundamentos, creen que no es la tierra sino más bien el fuego el que hallará reposo situado en el centro de la esfera... He aquí la opinión de ciertas personas sobre el lugar de la Tierra y sus doctrinas sobre su reposo o movimiento son parejas. Pero tampoco aquí piensan todos lo mismo. Los que niegan que la Tierra se encuentre asentada en el medio, suponen que se mueve circularmente alrededor del centro; y no es ella la única que lo hace, sino que también la anti-Tierra realiza ese mismo movimiento, como ya hemos dicho antes.

Algunos incluso son de la opinión de que hay un cierto número de cuerpos del mismo tipo movidos alrededor del centro, mas invisibles para nosotros debido a la interposición de la Tierra. Es por esa razón —según ellos— por lo que los eclipses de la Luna son más frecuentes que los del Sol, pues cada uno de esos cuerpos obstaculizaría la luz a la Luna en lugar de ser la Tierra misma quien lo haga» [33].

El origen de esa teoría del fuego central es incierto; quizá el descubrimiento de que la Luna no tiene luz propia, sino que la recibe del Sol, condujera a la conjetura adicional de que el Sol también reflejaba simplemente la luz de una fuente central, es decir, del fuego central. Este fuego se oculta a nuestra vista porque el globo terrestre en su revolución alrededor de él presenta siempre su otra cara deshabitada. La anti-Tierra nos es igualmente invisible porque también ella es ocurecida por la Tierra durante la revolución de ambos cuerpos alrededor del Sol; sin embargo, los frecuentes eclipses de Luna son prueba de su existencia. Así era a grandes rasgos la teoría pitagórica. Desde un punto de vista histórico, su importancia radica en que la idea misma de que la Tierra no es el centro del universo sino una estrella más, despejó el camino a teorías similares. En eso radica su valor histórico, que en modo alguno se ve afectado por el modo en que fue concebida.

Debemos señalar de paso que la escala pitagórica de valores cósmicos que definía el centro como más «honroso» que cualquier posición no-central reaparece en un contexto similar en el libro de Copérnico cuando éste defiende que la Tierra se mueve y los cielos están quietos: «La condición de inmovilidad se considera más noble y divina que el cambio o inconstancia. De ahí que el movimiento deba ser atribuido a la Tierra antes que al universo. Iré más lejos

y diré que parece completamente incomprensible atribuir movimiento a lo que contiene y sostiene y no a lo contenido y sostenido, esto es, la Tierra» (*De las revoluciones de los cuerpos celestes*, I, 8). La semejanza de la argumentación es fácilmente comprensible. Sólo la mecánica newtoniana podría proporcionar razones físicas de los movimientos celestes, pero esta misma mecánica sólo nacería como resultado de los avances en astronomía y de la teoría de Copérnico. De este modo, Copérnico seguía siendo, y en no poca medida, un contemporáneo de los científicos de la Antigua Grecia.

A propósito de la teoría de la anti-Tierra, debe mencionarse la otra explicación de Aristóteles que, como la primera, no es del todo favorable a los Pitagóricos: «Y todas las correspondencias que veían en los números y en las armonías con las afecciones y con las partes del cielo y con el orden universal, las reunían y reducían a sistema. Y si en algún punto faltaba algo, se apresuraban a añadirlo, para que toda su doctrina fuese coherente. Así, por ejemplo, puesto que la Década parece ser algo perfecto y abarcar toda la naturaleza de los números, dicen que también son diez los cuerpos que se mueven por el cielo, y, sólo siendo nueve los visibles, ponen como décimo la anti-Tierra» [34]. Esta exposición es particularmente interesante, ya que no hace mención alguna al fuego central y el noveno de los cuerpos visibles es aparentemente la esfera de las estrellas fijas, concordando con la teoría de Aristóteles. Hay, pues, ciertos indicios de que los pitagóricos tardíos devolvieron a la Tierra su posición en el centro del cosmos, y situaron el fuego en el centro de la Tierra. Por otra parte, fuentes más tardías mencionan una nueva teoría que fue propuesta por la escuela pitagórica a finales del siglo v y comienzos del IV a.C., y fue aceptada por Heráclides de Ponto: «De acuerdo con Teofrasto, Hicetas de Siracusa mantenía que los cielos, el Sol, la Luna, las estrellas y todas las alturas estaban fijas y estacionarias y que, al margen de la Tierra, nada se mueve en el universo. Por el contrario, como la Tierra rota sobre su eje a una gran velocidad, todo hace parecer que ésta estuviera siempre quieta mientras los cielos se mueven» [35]. De acuerdo con otra tradición, «Heráclides de Ponto y Ecfanto el pitagórico pusieron a la Tierra en movimiento, aunque no en el sentido de traslación, sino en el sentido de la rotación, como una rueda fija sobre un eje que girase de oeste a este alrededor de su propio centro» [119].

Copérnico menciona explícitamente en la introducción a su libro —donde explica cómo llegó a su teoría— los nombres de Hicetas, Ecfanto y Heráclides, junto con las antiguas referencias a ellos. En ello volvemos a encontrar la conexión existente entre los comienzos de la astronomía moderna y la del siglo IV a.C. Hay, no obstante, una diferencia importante entre ambas. En el mundo antiguo, la teoría de la rotación de la Tierra sobre su eje no consiguió alcanzar una posición establecida a pesar de su influencia sobre Platón. Como admite todo el mundo, no está claro si Platón consideraba que de hecho la Tierra rotaba; el rompecabezas del *Timeo* puede entenderse de muchas maneras y ha sido interpretado de modos diferentes. Pero lo que es indudable es que consideraba la rotación de una esfera sobre su eje como el más perfecto de los movimientos y que adscribía ese movimiento a todas las estrellas —incluyendo, posiblemente, a la Tierra— como un tipo de movimiento universal. Para Platón la rotación sobre un eje era la manifestación suprema de la razón, como explica en las *Leyes:* «De esos dos movimientos, el que se mueve en un mismo lugar debe necesariamente hacerlo siempre alrededor de algún centro, siendo una copia de las esferas giratorias, y es el que tiene posiblemente un parentesco y similaridad más estrechos con la revolución de la razón. ...Si los describimos a ambos como moviéndose regular y uniformemente en el mismo lugar en torno a las mismas cosas y en relación a las mismas cosas, según una ley y sistema —a saber, la razón y el movimiento que da vueltas en un lugar (semejante a las revoluciones de un globo giratorio)— nunca correremos el peligro de ser juzgados poco diestros en la construcción de imágenes acertadas por medio del lenguaje» [134]. Platón trazó una analogía entre la razón y los movimientos perfectamente precisos de los cielos: «Todo el curso y movimiento del cielo y de cuanto contiene posee un movimiento semejante al movimiento y revolución y los cálculos de la razón» [133]. El cosmos mismo, pues, rota sobre su eje, como subraya Platón en el *Timeo,* es decir, carece de los tres grados traslacionales de libertad (o, en el lenguaje de Platón, de los seis movimientos hacia arriba, hacia abajo, hacia delante, hacia atrás, a la derecha y a la izquierda), desarrollando sólo el séptimo, giro. Más aún, reitera que ese movimiento es universal y se encuentra en todas las estrellas.

Es divertido observar cómo llega Platón, mediante el razonamiento alegórico y la pura deducción, a una de las conclusiones em-

píricas de la astronomía y cosmología modernas; concretamente, a la existencia de un movimiento rotatorio en el cosmos, como el observado tanto en la rotación de las estrellas sobre sus ejes como en la rotación de los grandes sistemas y las galaxias cósmicas.

Ni la idea de Platón ni las hipótesis de Heráclides, Hicetas y Ecfanto fueron retomadas por los astrónomos que les sucedieron. La teoría del giro no constituía una parte esencial de la definición platónica de las estrellas consideradas como instrumentos del tiempo. El movimiento circular de las estrellas alrededor de la Tierra, como cualquier otro mecanismo cíclico, era suficiente como reloj y, lo que es más, ésa es la base de nuestra medida del tiempo. La opinión generalmente admitida de que el reposo es «más noble» que el movimiento militó realmente en contra de la idea de una rotación universal. Ningún ejemplo más notorio de ello que la imagen que Plutarco tenía sobre la teoría del tiempo de Platón: «Por tanto, es mejor decir que la Tierra es un instrumento del tiempo, no en el sentido literal de que tenga movimiento como las estrellas, sino en el de que estando siempre quieta divide las salidas y puestas de las estrellas en períodos mediante los cuales se determinan las medidas primarias del tiempo —el día y la noche...— del mismo modo que las agujas de los relojes de sol no cambian su posición con las sombras, sino que se convierten en instrumentos para medir el tiempo permaneciendo en su lugar. Imitan así a la Tierra, que oscurece al Sol cuando éste pasa bajo ella» [138]. Ptolomeo asentó sobre bases «científicas» el rechazo a la teoría de que la Tierra rota sobre su eje quinientos años después de Heráclides. El razonamiento ptolemaico está basado por completo en el desconocimiento de la ley de inercia e, incluso Copérnico, viviendo como lo hizo en la época anterior a la mecánica moderna, sólo pudo aportar argumentos cualitativos contra aquél.

El libro de Ptolomeo es un compendio de las teorías de las generaciones previas, especialmente de la de Hiparco. Su intento de refutar los puntos de vista de Heráclides es, por tanto, de especial interés: «Ciertos pensadores, aunque nada tenían que oponer a los argumentos anteriores, han amasado un esquema que consideran más aceptable, y piensan que no puede aducirse ninguna evidencia en su contra si sugieren por mor de la argumentación que el cielo carece de movimiento, y que es la Tierra la que rota sobre uno y el mismo eje de oeste a este, completando una revolución aproximadamente

cada día, o alternativamente que tanto el cielo como la Tierra tienen una rotación de alguna importancia, sea la que sea, sobre el mismo eje, como decimos, pero tal que mantiene sus posiciones relativas. Estas personas olvidan, sin embargo, que en tanto que, por lo que respecta a las apariencias en el mundo estelar, podría no haber quizá ninguna objeción a esta teoría en su forma más simple, a juzgar por las condiciones que nos afectan a nosotros mismos y a aquellos en el aire en torno a nosotros, una hipótesis semejante ha de ser considerada bastante ridícula... Deben admitir que la rotación de la Tierra sería más violenta que cualquiera de los movimientos que tienen lugar en torno a ella, si en un tiempo tan corto da un giro completo tan colosal, y por tanto que todo lo que no está realmente asentado en la Tierra debería parecer describir uno y el mismo movimiento siempre en sentido contrario a la Tierra, y que las nubes y todas las cosas que vuelan o pueden ser lanzadas nunca podrían ser vistas viajando hacia el este, puesto que la Tierra siempre estaría adelantándose a ellas y previniendo su movimiento hacia el este, de tal manera que todo lo demás daría la impresión de retroceder hacia el oeste y las partes que la Tierra iría dejando tras de sí. Porque, incluso si mantuvieran que el aire es acarreado con la Tierra en la misma dirección y a la misma velocidad, los cuerpos sólidos en él tendrían siempre que parecer retroceder en el movimiento conjunto de la Tierra y el aire, o, aun cuando los mismos cuerpos sólidos estuvieran, por así decir, ligados al aire y fueran acarreados con él, nunca podría parecer que se mueven hacia adelante o que quedan atrás, sino que siempre parecerían inmóviles, y nunca podrían, aun cuando volasen o fueran arrojados, hacer algún viaje o cambiar su posición, aun cuando veamos con tanta claridad que todas esas cosas suceden, como si ninguna deceleración o aceleración les afectara como consecuencia del movimiento de la Tierra» [271].

El papel de Aristóteles en la «ideología» geocentrista será discutido de nuevo más adelante. El primer griego que adoptó un punto de partida decididamente heliocéntrico fue Aristarco de Samos (c. 310-230 a.C.), anticipándose así a Copérnico en unos mil ochocientos años. Su hipótesis de que la Tierra gira alrededor del Sol mientras rota sobre su propio eje es representativa de la era dorada de la ciencia griega en la que fue formulada. Aristarco fue contemporáneo de Arquímedes y Eratóstenes, vivió pocas décadas después de Euclides y cien años más o menos antes de Hiparco y Posidonio.

Contamos con dos fuentes importantes para su teoría. La primera y de mayor peso es la referencia de Arquímedes al mismo problema en su *Arenario,* en el que idea un método para expresar grandes números y lo ilustra construyendo el número de granos de arena contenidos en una esfera del tamaño del cosmos. El pasaje relevante es como sigue: «Eres consciente de que 'universo' es el nombre dado por la mayoría de los astrónomos a la esfera, cuyo centro es el centro de la Tierra y cuyo radio es igual a la recta que une el centro del Sol y el de la Tierra, tal y como has visto en los tratados escritos por los astrónomos. Pero Aristarco de Samos produjo un libro que consistía en ciertas hipótesis cuyas premisas llevaban a la conclusión de que el universo es varias veces mayor de lo que ahora llamamos así. Las hipótesis son que las estrellas fijas y el Sol permanecen quietos, que la Tierra gira alrededor del Sol en la circunferencia de un círculo, con lo que el Sol descansa en el medio de su órbita, y que la esfera de las estrellas fijas, situada sobre el mismo centro que el Sol, es tan grande que el círculo en el que supone que gira la Tierra guarda tal proporción respecto a la distancia a que se encuentran las estrellas fijas como la que existe entre el centro de la esfera y su superficie» [237].

Arquímedes observó correctamente que la última sentencia no tiene sentido, pues, ¿qué relación puede haber entre el centro de una esfera, que no es más que un punto, y su superficie? Arquímedes explicó esas palabras suponiendo que Aristarco asumía que la razón entre el globo terrestre (representado como un punto) y la esfera contenida en la órbita de la Tierra en torno al Sol era igual a la razón entre esta última y la esfera de las estrellas fijas.

En lo tocante a la cuestión que aquí nos ocupa, ese pasaje de Arquímedes menciona sólo la revolución de la Tierra en torno al Sol. Pero el segundo de nuestros elementos de apoyo hace referencia también a la rotación de la Tierra sobre su eje. Se encuentra en el libro de Plutarco *De la cara de la Luna,* que es una discusión amigable sobre las propiedades físicas de la Luna: «No lances contra mí una acusación de impiedad como la que Cleantes decía que los griegos habían lanzado contra Aristarco de Samos por mover el corazón del universo cuando intentaba salvar los fenómenos mediante la asunción de que el cielo está en reposo, mientras que la Tierra gira en una órbita oblicua al tiempo que rota también sobre su propio

eje» [235]. Estas palabras ponen en claro que la hipótesis de Aristarco no logró aceptación fundamentalmente por motivos religiosos.

Trescientos años más tarde, Plutarco recuerda la violenta oposición de uno de los fundadores de la escuela estoica a la teoría heliocéntrica, y nos informa que Aristarco se encontró casi en la misma situación de Anaxágoras, quien había sido condenado por blasfemia por enseñar que las estrellas eran rocas ígneas. Es un hecho que en la época de Aristarco la situación era bastante más grave que en la de Anaxágoras, pues la posición central de la Tierra y su reposo absoluto, tal y como habían sido formulados por Aristóteles, se habían convertido para entonces en un axioma, sin que ello supusiera renunciar en modo alguno a la naturaleza divina de las estrellas en sus cursos invariables. Muy al contrario, las dos concepciones, siendo como eran complementarias pese a apoyarse mutuamente, se convirtieron simplemente en dos aspectos de una misma imagen cósmica fuertemente religiosa.

No obstante, no sería correcto centrarse en la oposición de tipo religioso contra la teoría heliocéntrica, ignorando los argumentos científicos que se adujeron en su contra. Ya hemos visto las razones de Ptolomeo para rechazar la rotación de la Tierra sobre su eje y que se remitían a la doctrina de Aristóteles, quien tampoco aceptaba la idea de que la Tierra girase alrededor del Sol. Todos estos argumentos se basaron en la ausencia de paralaje de las estrellas fijas, y serían finalmente refutados cuando se probó empíricamente (en 1838, por Bessel) que tal paralaje, aunque pequeño, existía de hecho. Incluso Copérnico fue incapaz de hallar otra respuesta a ese argumento que la suposición (que resultaría a la postre ser correcta) de que las paralajes eran demasiado pequeños para poder ser medidos. La respuesta dada por Aristarco no nos es conocida. La objeción de Aristóteles se encuentra en su *De Caelo,* en el que señala justamente que si la Tierra girase alrededor del centro, ese movimiento se vería reflejado en cambios de posición de las estrellas fijas. Si tradujéramos a términos científicos modernos esa objeción, se tendría: así como el movimiento epicíclico de los planetas refleja la revolución anual de la Tierra, así también debería haber un movimiento «epicíclico» de las estrellas fijas, es decir, un cambio en el ángulo (paralaje) en que la Tierra, a lo largo del año, aparecería para un observador situado a la distancia en que se hallan las estrellas fijas. O en palabras de Aristóteles: «Si esto fuera así, necesariamente se producirían avan-

ces y retrocesos de las estrellas fijas. Mas no se ha observado que así ocurra, sino que por el contrario las mismas estrellas salen y se ponen en los mismos lugares de la Tierra» [160].

Si la agudeza de Aristóteles puede admirarnos, no podemos dejar de asombrarnos aún más ante la valentía científica de la imaginación de Aristarco. Está sujeto a duda si la teoría heliocéntrica fue de hecho rechazada debido solamente al argumento sobre la paralaje de las estrellas fijas; incluso si esa paralaje hubiera sido descubierta en su época —o en tiempos de Copérnico— probablemente se hubiera hecho todo lo posible para explicarla de modo que la teoría geocéntrica pudiera ser mantenida. Incluso la acusación de blasfemia de Cleantes no era sino una expresión común de un antagonismo más profundo. Copérnico y Galileo se encontraron en una posición muy diferente a la de Aristarco. En su época el argumento religioso se había convertido en inmensamente más poderoso gracias a la evidencia de la Biblia y la autoridad que la Iglesia concedió a Aristóteles. La concepción de Aristarco era simplemente demasiado aventurada para sus contemporáneos, quienes no estaban todavía preparados para la revolución intelectual que implicaba esa relativización de la posición del observador en el cosmos.

Todavía quedaba un largo camino hasta llegar a la audacia científica exigida por la aceptación de la relativización, que finalmente conduciría a la mecánica de Newton y a la quiebra de la antítesis entre cielo y Tierra. Por otra parte, la mecánica newtoniana introdujo nuevos valores absolutos en el mundo de la ciencia y en nuestra concepción del cosmos (espacio y tiempo absolutos). De ahí que sería más correcto comparar la concepción de Aristarco con la de Einstein en su teoría restringida de la relatividad centrada en la relatividad de espacio y tiempo. En el caso de Einstein, como en el de Aristarco, la oposición a la abolición de nociones absolutas apareció bajo una apariencia científica, y no pocos científicos intentaron denodadamente explicar la evidencia empírica —como en el caso de la dependencia de la masa respecto a la velocidad— por medio de la teoría newtoniana. En términos generales, sin embargo, en nuestra época de ciencia organizada una nueva teoría es aceptada por expertos en el campo siempre que esté de acuerdo con todos los hechos conocidos y abra el camino para el descubrimiento de otros nuevos, incluso a pesar de que pueda implicar cambios en la estructura de toda una filosofía.

Un factor que contribuyó a la no aceptación de la hipótesis de Aritarco fue el aislamiento del científico en el Mundo Antiguo, que era el resultado de la ausencia de una tradición de enseñanza científica organizada. Sólo sabemos de Seleuco, quien enseñó la doctrina de Aristarco en Babilonia en el siglo II a.C. Nuestra fuente de información es Plutarco: «¿Qué quería decir Timeo al afirmar que hay almas dispersas sobre la Tierra, la Luna y en todos los demás instrumentos de tiempo? ...¿Quería decir poner a la Tierra en movimiento como hizo con el Sol, la Luna y los cinco planetas, a los que llamaba los instrumentos del tiempo en razón de sus giros? Y, ¿era necesario concebir que la Tierra, "girando en torno a su eje vagaba por el universo", no era representada como estable e inmóvil, sino como girando y rotando, tal como Aristarco y Seleuco después mantuvieron, afirmándolo el primero sólo como hipótesis, y el segundo como una opinión definida? Pero Teofrasto añade a su relato el detalle de que Platón en sus últimos años lamentó haber dado a la Tierra el centro del universo, que no era apropiado para ella» [138].

La imagen griega del cosmos estaba determinada en gran medida por el paso de ver el cielo en dos dimensiones —como un dosel extendido sobre la Tierra— a verlo en tres dimensiones, añadiendo la profundidad del espacio. Este proceso se extendió muy rápidamente desde el momento en que Pitágoras y sus discípulos descubrieron que la Tierra era una esfera. No se nos ha contado cómo llegaron a ese descubrimiento y muy bien pudo haber comenzado como una mera conjetura. En el libro de Aristóteles *De Caelo* encontramos exactamente las mismas pruebas de la esfericidad que las usadas hoy por la geografía escolar: «Si la Tierra no fuera esférica los eclipses de la Luna no exhibirían las secciones que se les conocen..., durante los eclipses siempre tiene una línea curva como límite. En consecuencia, como el eclipse es debido a la interposición de la Tierra, es el perfil de ésta lo que, debido a su forma esférica, produce esa figura. Las observaciones del modo en que nos aparecen los astros no sólo prueban que la Tierra es esférica, sino también que su tamaño no es muy grande, ya que al desplazarse mínimamente hacia el sur o hacia la Osa, vemos modificarse el círculo del horizonte, por lo que los astros de debajo de nosotros cambian considerablemente y no son los mismos que brillan en el cielo cuando se va hacia la Osa que cuando se hace hacia el mediodía. Algunos astros visibles en Egipto o en la vecindad de Chipre son invisibles en re-

giones más septentrionales, y, además, algunos astros visibles en todo momento en las regiones septentrionales sufren una puesta en los países mencionados... Entre los matemáticos, aquellos que intentan calcular el tamaño de la circunferencia (terrestre) la calculan en unos 400.000 estadios. Basándonos en esas pruebas, concluiremos que, necesariamente, la masa de la Tierra no sólo es esférica, sino que, además, no es muy grande en relación a las dimensiones de otros astros» [161].

El valor numérico dado por Aristóteles aquí sobrepasa en un 50 por 100 el que debería resultar si consideramos la longitud común del estadio, o sea 160 metros. Volveremos sobre esas medidas exageradas, pero antes, una cita del geógrafo Estrabón (*c.* 63 a.C.-18 d.C.), que proporciona una prueba adicional de la figura de la Tierra: «La forma esférica de la Tierra se ve... en los fenómenos del mar y el cielo. De ello tenemos la evidencia de los sentidos y del sentido común. Pues es obvio que la curvatura del mar oculta a los navegantes las luces distantes que están a nivel de su vista, mientras que pueden ver esas luces cuando están por encima del nivel de sus ojos, aunque estén mucho más alejadas. Similarmente, desde un lugar elevado el ojo capta lo que antes le estaba oculto..., además, conforme los navegantes se aproximan a tierra se hace visible más y mas costa, y lo que en principio parecía bajo se eleva progresivamente» [233].

El reconocimiento de la esfericidad de la Tierra fue acompañado a partir de Aristóteles por el desarrollo de métodos de medición de la circunferencia. Una sorprendente descripción de dos de esos métodos ha llegado hasta nosotros en la *Teoría de las revoluciones de los cuerpos celestes* de Cleómedes, un estoico que vivió probablemente a comienzos de nuestra era. El principio básico de los dos métodos es idéntico: medir la distancia entre dos puntos situados en el mismo meridiano del globo y determinar el arco correspondiente a dicha distancia. Uno de los métodos fue usado por Eratóstenes (*c.* 275-195 a.C.) en Alejandría, y se basa en la altura del Sol el día del solsticio de verano. El segundo fue usado por Posidonio, el famoso filósofo estoico y maestro de Cicerón (*c.* 135-51 a.C.), que descubrió la dependencia de las mareas del movimiento de la Luna. Cleómedes describe el método de Posidonio así: «Posidonio dice que Rodas y Alejandría están en el mismo meridiano. Los círculos meridianos son círculos dibujados a lo largo de los polos del universo y pasan por el punto que está sobre la cabeza de cualquier

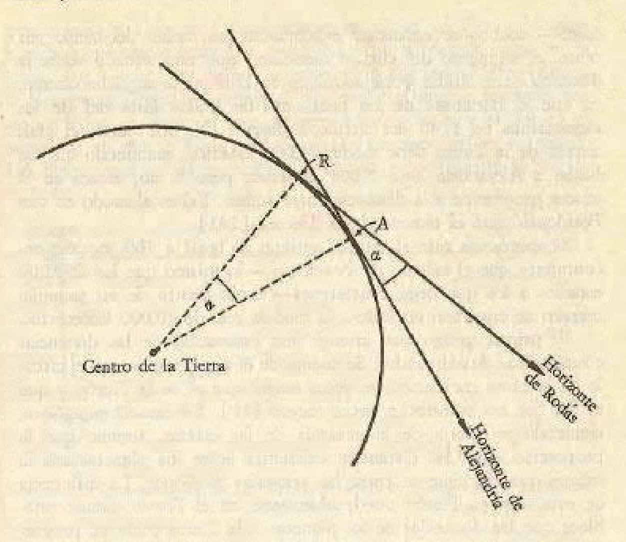


FIG. 5.—*La determinación de la circunferencia de la Tierra de Posidonio a partir de la distancia entre Rodas y Alejandría y el ángulo entre sus respectivos horizontes.*

individuo situado de pie sobre la Tierra. Los polos son los mismos para todos esos círculos, pero el punto vertical es diferente para cada persona... Rodas y Alejandría están en el mismo círculo meridiano y la distancia entre ambas ciudades es estimada en 5.000 estadios. Supuesto que tal sea el caso... Posidonio sigue diciendo que la estrella brillante llamada Canobus queda hacia el sur, prácticamente sobre el timón de Argos. Dicha estrella no es vista en toda Grecia, de ahí que Arato ni siquiera la mencione en sus *Efemérides*. Pero conforme se va de norte a sur, comienza a ser visible en Rodas y, cuando allí se ve sobre el horizonte, se pone inmediatamente conforme gira el universo. Cuando se han navegado los 5.000 estadios y se está en Alejandría, esa estrella se halla a una altura sobre el horizonte de un cuarto de signo —es decir, 1/48 del círculo del zo-

díaco— cuando se encuentra exactamente en medio del cielo; por tanto, el segmento del círculo meridiano que está situado sobre la distancia entre Rodas y Alejandría es de 1/48 parte de dicho círculo, ya que el horizonte de los habitantes de Rodas dista del de los alejandrinos en 1/40 del círculo zodiacal... Y, por tanto, el gran círculo de la Tierra debe medir 24.000 estadios, asumiendo que de Rodas a Alejandría haya 5.000 estadios; pero si no, estará en la misma proporción a la distancia entre ambas. Tal es el modo en que Posidonio trató el tamaño de la Tierra» [241].

Si aceptamos que el estadio antiguo es igual a 160 metros, encontramos que el cálculo de Posidonio —lo mismo que los 250.000 estadios a los que llegó Eratóstenes— están dentro de un pequeño margen de error con respecto a la medida real de 40.000 kilómetros.

El primer griego que intentó una estimación de las distancias cósmicas fue Anaximandro. Se cuenta de él que pensaba que el círculo de la Luna era diecinueve veces mayor que el de la Tierra, y que el del Sol era veintiocho veces mayor [10]. La escuela pitagórica, siguiendo su teoría de la armonía de las esferas, supuso que la proporción entre las distancias existentes entre los planetas era la misma que la existente entre las armonías musicales. La influencia de esta idea en Platón puede observarse en el *Timeo*, donde establece que las distancias de los planetas a la Tierra están en proporción de 1 : 2 : 3 : 4 : 8 : 9 : 27. Platón habla de «distancias dobles y triples», queriendo decir aparentemente que esos enteros son la combinación de dos series geométricas, una con el factor 2 (1, 2, 4, 8) y otra con el factor 3 (3, 9, 27). En la época de Platón, el orden de los planetas según la distancia creciente respecto a la Tierra se creía generalmente que era: Luna, Sol, Venus, Mercurio, Marte, Júpiter, Saturno. Durante los siglos III y II, los astrónomos griegos adoptaron un nuevo orden basado en los períodos de las estrellas: Luna, Mercurio, Venus, Sol, Marte, Júpiter y Saturno. Esa modificación fue probablemente influida por la hipótesis de Heráclides —mencionada antes— de que Mercurio y Venus giran alrededor del Sol.

El primer intento serio de calcular las distancias astronómicas o las proporciones entre éstas fue obra de Aristarco. Sus métodos, y los de sus seguidores, marcaron el punto culminante de los logros griegos en astronomía matemática. Aristarco intentó calcular las distancias relativas del Sol y la Luna a la Tierra. Empezó suponiendo

que cuando la Luna está iluminada en su mitad, la Tierra, la Luna y el Sol forman un triángulo rectángulo con su ángulo recto en la Luna. Por tanto, para hallar la proporción del lado Tierra-Luna a la hipotenusa Tierra-Sol, tenemos que medir el ángulo formado por ambos lados, es decir, el arco situado entre la Luna y el Sol en el momento en que la Luna está iluminada exactamente en su mitad. Las dificultades de tal medición son obvias, especialmente si han de

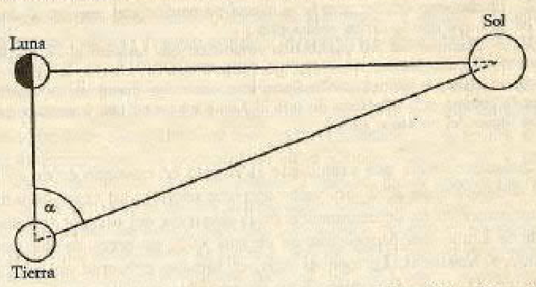


FIG. 6.—*La determinación de las distancias relativas Tierra-Sol y Tierra-Luna de Aristarco.*

tomarse durante el día a una hora en la que ambos cuerpos celestes estén sobre el horizonte —un requisito que hace aún más difícil determinar el momento en que la Luna es un semicírculo exacto. El método no es exacto, pues el ángulo que ha de medirse es de alrededor de 90° (89°52'), y, por tanto, un ligero error en su determinación produce un gran error en el resultado final, o sea, en la proporción entre las dos distancias.

El método y resultados son proporcionados por el ensayo de Aristarco *Del tamaño y la distancia del Sol y la Luna,* del que se han extraído las siguientes afirmaciones:

«1. Que la Luna recibe su luz del Sol.
2. Que la Tierra se comporta como un punto y centro de la esfera en que se mueve la Luna.
3. Que cuando la Luna nos aparece mediada, el gran círculo que divide las porciones oscura y brillante de la Luna está en la misma dirección que nuestro ojo.

4. Que cuando la Luna aparece mediada, su distancia al Sol es menor entonces que un cuadrante en un treintavo de cuadrante.

5. Que la anchura de la sombra de la Tierra es de dos Lunas.

6. Que la Luna ocupa una quinceava parte de un signo del zodíaco.

Dadas estas hipótesis, está probado que:

1. La distancia del Sol a la Tierra es más de dieciocho veces, y menos de veinte veces, la distancia de la Luna a la Tierra, lo que se sigue de la hipótesis de la Luna mediada.

2. El diámetro del Sol guarda la misma proporción con respecto al diámetro de la Luna que la arriba mencionada.

3. El diámetro del Sol guarda una proporción con respecto al de la Tierra mayor que la existente entre 19 y 3, pero menor que la existente entre 43 y 6, lo que se sigue de la proporción descubierta entre las distancias, la hipótesis sobre la sombra y la hipótesis de que la Luna subtiende una quinceava parte de un signo del zodíaco» [236].

Aristarco halló, por tanto, que el ángulo en cuestión es de 87°, y esta desviación de 2°52' del valor correcto produjo un error de veinte y pico veces en su determinación de la distancia del Sol por relación a la de la Luna; esa proporción es de casi 400, no cerca de 20, como mantuvo Aristarco. Lo que es más, el tamaño aparente de la Luna no es de 2°, como él supuso, sino de aproximadamente medio grado. Estas medidas fueron mejoradas por Hiparco y Posidonio en el siglo siguiente, y fueron completadas al determinar las distancias de la Luna y el Sol en unidades de diámetros terrestres. La exactitud de esas medidas varió según investigadores, pero al final la distancia de la Luna fue establecida con un error de menos del 10 por 100, mientras que el valor de la distancia del Sol fue calculado con una aproximación no mayor al 60 por 100 del valor real, y el valor de su diámetro en no más del 35 por 100 del tamaño real.

Así los astrónomos griegos llegaron a un orden de magnitud correcto para algunas de las distancias principales del sistema solar. No obstante, no es la exactitud numérica de sus cálculos lo importante aquí, sino su uso de métodos geométricos y trigonométricos para medir las dimensiones celestes. La matematización del cosmos, la transformación de su amplitud en un dominio de mediciones geodésicas que podían tratarse del mismo modo que las dimensiones terrestres, el reconocimiento de que el espacio tiene profundidad y la determinación de sus distancias en unidades de la geografía terrestre, todo ello constituyó el último eslabón de la cadena de desarrollo astronómico griega que comenzó con Pitágoras. Todo ese pro-

ceso se inició al asociar la precisión de los movimientos celestes con la divinidad de las estrellas. Dicha asociación fue tan estrecha que el incremento constante de la exactitud de los métodos empleados o su afinidad a las medidas seculares, terrestres, no pudo superarla.

Más adelante veremos que el «ateísmo» de Epicuro, quien intentó continuar la tradición de Anaxágoras y los racionalistas milesios secularizando los cielos, no logró sobrepasar a la otra tendencia. Las razones de ese fracaso residen básicamente en el método mismo de Epicuro: su enfoque era menos científico y la tradición de exactitud científica continuó siendo inseparable de la tradición «teísta», tanto dentro de las grandes escuelas —como la de los Estoicos— como fuera de ellas. Un científico como Posidonio consideraba al Sol una fuerza divina. La posición de su discípulo Cicerón, tal y como fue expresada en su obra *De Natura Deorum*, es característica de la actitud de un intelectual del último siglo antes de Cristo: «Y en verdad Aristóteles ha de ser alabado por su idea de que el movimiento de todos los seres vivos se debe a una de estas tres causas: naturaleza, fuerza o voluntad; ahora bien, el Sol, la Luna y todas las estrellas están en movimiento y los cuerpos que se mueven por naturaleza son llevados bien hacia abajo debido a su propio peso, bien hacia arriba debido a su ligereza; mas ninguna de estas cosas sucede en el caso de los cuerpos celestes, ya que su movimiento es el de revolución en un círculo. Además, tampoco puede decirse que alguna fuerza mayor les compela a discurrir de modo contrario a su naturaleza, porque, ¿qué fuerza tan enorme podría ser? Nos queda, por tanto, que el movimiento de los cuerpos celestes sea voluntario. Cualquiera que creyese esto mostraría no sólo ignorancia, sino también impiedad si negase la existencia de los dioses» [173]. Estas palabras son de lo más instructivas al mostrar cómo la sublimación del influjo astral y la tradición pitagórica fueron reforzadas después por las doctrinas científicas de Aristóteles. De éste hablaremos ahora más extensamente.

Capítulo IV
EL COSMOS DE ARISTOTELES

«Cuanto son los cielos más altos que la tierra, tanto están mis caminos por encima de los vuestros, y por encima de los vuestros mis pensamientos.»

Is. 55.9

La doctrina física de Aristóteles fue aceptada como dogma durante sesenta generaciones. Ninguna otra figura de la historia de la ciencia, y muy pocas en todo el curso de la cultura humana, ejerció una influencia tan profunda y duradera sobre el pensamiento posterior. Ya en el Mundo Antiguo, las ideas de Aristóteles —o las propuestas en su nombre— llevaban el sello de la autoridad suprema que sólo unos pocos espíritus agudos osaron rechazar y su autoridad no fue en modo alguno debilitada por las afirmaciones opuestas realizadas, a finales del período clásico y comienzos de la Edad Media, en nombre de la filosofía platónica, pues en la esfera de la ciencia natural no había entre los dos filósofos una diferencia esencial de opinión. Finalmente, los principales intérpretes de las tres grandes religiones, mezclaron los principios básicos de la filosofía de Aristóteles con sus concepciones religiosas del universo, transformando así el conjunto —incluidos sus conceptos físicos y cosmológicos— en dogma de fe.

Aunque esa evolución supuso un serio obstáculo para el progreso científico a comienzos de la era moderna, ya en el Mundo Antiguo fue la majestad dominadora de Aristóteles la que había decidido si el pensamiento científico habría o no de avanzar. Su influjo sobre la ciencia física y la imagen global del cosmos fue, en líneas generales, más negativa que positiva debido fundamentalmente a dos

razones: el enfoque aristotélico de los fenómenos naturales se extendió a partir de una concepción que no dejaba sitio para el mundo físico, pese a que tenía mucho que ofrecer a las ciencias biológicas en que Aristóteles había obtenido sus mayores éxitos; y, además, tendió a encajar todos sus hallazgos en esquemas fijos y, así, a construir sobre ellos una teoría general que él declaró absoluta. Cualesquiera pudieran ser las ventajas metodológicas de tal enfoque, quedaron contrarrestadas por sus desventajas en un ámbito que dependía esencialmente del experimento y la naturaleza de los hechos. La formulación de dogmas se convierte en un peligro, especialmente si procede a la recopilación de una evidencia empírica suficiente.

El principio guía de la concepción aristotélica de la naturaleza fue la teleología: el axioma de que todo cuanto ocurre está encaminado a cierto fin y que todo el cosmos, con todo cuanto contiene, es el resultado de un plan previo. La filosofía de Aristóteles está tan dominada por el principio teleológico que suele considerársele su inventor. Aunque de hecho pueda retrotraerse, fue él quien lo rescató, perfeccionó y dio una importancia que nunca antes había tenido.

Ya hemos visto al principio cómo la ciencia griega empezó a buscar un substrato físico que fuera la base de los fenómenos. Descubrimos que fue Empédocles el primero en añadir a ese principio la fuerza (o, como él creía, las dos fuerzas contrarias) que daba forma a la materia y, a través del movimiento, la mantenía unida y la dividía en partes. Esa idea aparece de nuevo —aunque en forma algo modificada— en la doctrina de Anaxágoras. También él consideró necesario introducir en su representación del cosmos un principio motor que llamó "mente". El principal pasaje sobre la naturaleza y funciones de dicha "mente" puede ser interpretado de formas diversas: «Todas las demás cosas contienen una parte de todo, pero la Mente es infinita y autónoma y no está mezclada con nada sino que ella sola es por sí misma... La Mente gobernó también la rotación universal, de tal manera que todo comenzó a girar en el principio. Empezó a girar, primeramente, a partir de un área pequeña, ahora gira sobre una mayor y girará sobre otra aún mayor. Conoce todas las cosas mezcladas, separadas y divididas. La Mente ordenó cuantas cosas habían de ser, todas cuantas fueron y ahora no son, todas cuantas ahora son y cuantas serán, incluso esta revolución en que ahora giran las estrellas, el Sol y la Luna, el aire y el éter que están siendo separados. Esta rotación los hizo separarse. Lo denso

se separó de lo raro, lo cálido de lo frío, lo brillante de lo tenebroso y lo seco de lo húmedo. Hay muchas porciones de muchas cosas, pero ninguna está separada ni dividida completamente de la otra, salvo la Mente» [57].

Podría parecer que Anaxágoras consideraba esa "mente" como la primera y última causa del movimiento, así como una sustancia física en esencia. Realmente la describe como algo distinto a las otras sustancias, fundamentalmente en virtud de su función de introductora de ese orden presente, pero en ninguna parte menciona que la "mente" funcione de acuerdo con algún plan preconcebido que esté destinado a producir un orden deseable, bueno o bello. En el mismo término 'mente' hay, sin embargo, algo que induce o acelera un proceso de pensamiento tal y del que encontramos indicios en las frases de uno de los contemporáneos más jóvenes de Anaxágoras, Diógenes de Apolonia: «Pues no sería posible sin inteligencia, que ésta (la sustancia subyacente) esté dividida de tal manera que posea las medidas de todas las cosas —del invierno y del verano, del día y de la noche, y de las lluvias, el viento y el buen tiempo. Y también las demás cosas, si quisiéramos considerarlas, las hallaríamos dispuestas del mejor modo posible» [69]. Aquí "inteligencia" y "mente" son mencionadas explícitamente como agentes teleológicos que intencionalmente disponen las cosas en el orden adecuado: la armonía del universo no surgió por sí misma ni por la acción de un principio físico, sino mediante la fuerza de una ley inteligente dispositiva que tiende a la perfección.

Esta evolución que, como vemos, comenzó en el período presocrático, alcanzó su clímax en tiempos de Platón. En el *Fedón* puso en boca de Sócrates duras palabras de crítica a la "mente" de Anaxágoras, sobre la base de que había defraudado las esperanzas que su nombre había inducido en Sócrates a depositar en ella: «Pero oyendo en cierta ocasión a uno que leía un libro, según dijo, de Anaxágoras, y que afirmaba que es la mente la que lo ordena todo y es la causa de todo, me sentí muy contento con esa causa y me pareció que de algún modo estaba bien que la mente fuera la causa de todo y consideré que, si eso es así, la mente ordenadora lo ordenaría todo y dispondría cada cosa de la manera que fuera mejor. De modo que si uno quisiera hallar respecto de cualquier cosa la causa de por qué nace o perece o existe, le sería preciso hallar respecto a ella en qué modo le es mejor ser o padecer, o cualquier otra cosa... Reflexio-

nando esto, creía muy contento que yo había encontrado un maestro de la causalidad... de acuerdo con mi inteligencia, Anaxágoras... Y estaba también dispuesto a informarme acerca del Sol y de la Luna y de los demás astros, acerca de sus respectivas velocidades y de sus movimientos y demás cambios, de qué modo le es mejor a cada uno hacer y experimentar lo que experimenta... Pero de mi estupenda esperanza, amigo mío, salí defraudado, cuando al avanzar y leer, vi que el hombre no recurre para nada a la inteligencia ni le atribuye ninguna causalidad en la ordenación de las cosas, sino que aduce como causas aire, éter, agua y otras muchas cosas absurdas» [121].

En el capítulo anterior esa misma acusación contra Anaxágoras aparecía en el ataque de Platón contra la idea de que las estrellas son rocas ígneas carentes de mente y alma, pero la forma que aquí en el *Fedón* se le da, tiene una aplicación más general. Podríamos entender por las palabras de Sócrates que él considera la causa teleológica como la única explicación verdadera de los fenómenos cósmicos. Aunque no niegue la existencia de otras causas, las considera carentes de valor para la explicación racional de las cosas, ya que no proporcionan una razón de éstas ni las unen entre sí en una unidad ordenada cuyas partes estén designadas a satisfacer un cierto fin. Lo que Platón quiere decir queda muy claro en el siguiente famoso pasaje del *Fedón:* «El estar sentado aquí en la cárcel (dice Sócrates) ¿queda explicado simplemente por el hecho de que tengo huesos y articulaciones y músculos flexibles que me permiten sentarme aquí? ¿No habría más bien de buscarse la verdadera causa de ello en mi decisión de permanecer aquí tras el veredicto? Y lo que es más, ¿han de explicarse las palabras que estoy ahora pronunciando únicamente por las leyes del sonido y la audición? No puede dudarse (continúa) de que existe aquí una confusión entre el concepto de causa verdadera y el de las condiciones que son necesarias para la existencia de ésta». Lo mismo es cierto de la explicación platónica de la naturaleza: los hombres suponen causas físicas para explicar los fenómenos sin darse cuenta de que hay una fuerza «que las dispone del mejor modo posible».

Hoy nos basta mirar a nuestro alrededor para ver que el rápido avance de las ciencias naturales en los últimos siglos sólo comenzó cuando los científicos cesaron de buscar las «causas verdaderas» y limitaron su curiosidad a las «condiciones necesarias» de dichas causas. El paisaje del cosmos moderno se abrió ante nosotros el día en

que los científicos del siglo XVII desecharon preguntar «Por qué» o «Con qué propósito» y se limitaron a la pregunta «Cómo», a la investigación de las «causas auxiliares» o causas secundarias —como Platón las llamaba en el *Timaeus (Timeo).*

En esa obra, Platón envuelve su teoría teleológica en una alegoría cosmológica. Describe en detalle los mecanismos del mundo físico que el demiurgo utiliza para sus propios fines, subrayando al mismo tiempo que no hay más causas que aquellas que cooperan a la consecución del mejor fin. Y continúa: «La gran mayoría humana las considera no como accesorias, sino como las únicas causas de todas las cosas, produciendo sus efectos por enfriamiento o calentamiento, compactación o rarefacción y procesos similares. Pero tales cosas son incapaces de plan o previsión alguna con un determinado propósito... Y el amante de la inteligencia y el conocimiento, necesariamente habrá de buscar primero la causa que pertenece a la naturaleza inteligente y, sólo en segundo lugar, aquella que pertenece a las cosas movidas por otras y que, por tanto, necesariamente ponen en movimiento a unas terceras» [130].

La escala de valores que es impuesta aquí a la investigación de la naturaleza, culminando como lo hace en la explicación teleológica del universo, se convertiría después en la clave de la física de Aristóteles, quien, yendo aún más lejos, construyó toda su teoría dinámica sobre el supuesto de la existencia de una «naturaleza inteligente» que funciona con un designio deliberado. Aristóteles define sus cuestiones de principio en el curso de una refutación de aquellos filósofos presocráticos que consideraban los fenómenos naturales como producto de la «necesidad» o, en términos modernos, de la conformidad a una ley mecánica. Dicha necesidad se suponía era tan activa ahora como lo había sido cuando se formó el cosmos, cuando el orden se creó a partir de la materia primigenia. Empédocles incluyó también la formación del mundo orgánico en ese supuesto mecanismo de la necesidad; en su opinión, la naturaleza creó criaturas vivas de todas las formas posibles, incluyendo mezclas de hombre y bestia, pero no todas esas combinaciones sobrevivieron y las formas que hoy existen fueron las únicas que pudieron sobreponerse a la acción recíproca de las fuerzas de la necesidad cósmica.

Para Aristóteles toda conformidad a ley es teleológica, como así lo es la desplegada en la creación del artista. La regular recurrencia de los fenómenos naturales es manifestación de ese género de ley

en que tanto el plan como el propósito son evidentes, mientras que cualquier desviación de la regularidad se presenta como un «antojo», un error del artista. En el segundo libro de su *Física* Aristóteles pregunta: «¿Por qué no habría de trabajar la naturaleza, no en beneficio de algo ni porque así sea mejor, sino que lloviera del cielo, no justo para que crezca el maíz, sino por necesidad? Lo que asciende debe enfriarse y lo que se ha enfriado ha de transformarse en agua y descender, siendo el resultado de todo ello que el maíz crezca. De modo similar si la cosecha de un hombre se está estropeando sobre la tierra removida, la lluvia no cae para lograrlo —para que la cosecha se estropee— aunque de ello se derive justo ese resultado. Por qué, entonces, no habría de ocurrir lo mismo con las partes de la naturaleza, e.g. que nuestros dientes estuvieran conformados a la necesidad —siendo los delanteros afilados, dispuestos para desgarrar, los molares anchos y aptos para triturar la comida—, aunque no salgan por ese motivo sino que sea meramente una coincidencia; y así con todas las demás partes de las que suponemos existen con un cierto propósito. Así, dondequiera que las partes resultan ser justo como deberían haber sido si hubieran sido hechas con un fin, esas partes sobreviven, organizándose espontáneamente de forma adecuada, mientras que las que se formaron de modo diferente perecieron y continúan pereciendo, como Empédocles dice que hizo su «vástago de buey con rostro humano». Estos son el tipo de argumentos —y otros similares— que pueden ocasionar dificultades sobre este punto ya que es imposible que ésta pudiera ser la concepción verdadera, ya que los dientes y todas las demás cosas naturales se producen de un determinado modo, sea invariable o normalmente, lo que no es cierto de ninguna de las cosas que resultan del azar. No adscribimos al azar la frecuencia de las lluvias en el invierno, pero sí lo hacemos con las lluvias frecuentes en verano; ni lo hacemos con el calor en los días de canícula, pero sí con el calor en invierno. Así, si estamos de acuerdo en que las cosas son el resultado de la coincidencia o tienden a un fin, y que esto último no puede ser fruto de una coincidencia o de la espontaneidad, de ello se sigue que deben tender a un cierto fin y que todas las cosas lo son por naturaleza es algo sobre lo que los defensores de la teoría anteriormente expuesta concordarían. Por tanto, la acción que tiende a un fin está presente en todas las cosas que llegan a ser y son por naturaleza. Más aún, cuando una serie tiene un punto de conclusión, todos los pasos anterio-

res van dirigidos a ésta. *Así*, tal como sucede en la acción racional, sucede en la naturaleza, y tal como sucede en ésta, sucede en toda acción, si nada la interfiere. Puesto que la acción racional tiende a un fin, así también lo hará, por ende, la naturaleza de las cosas; pues si una casa, por ejemplo, hubiera sido una cosa hecha por la naturaleza, lo habría sido del mismo modo como de hecho ha sido hecha por el arte, y si las cosas creadas por la naturaleza lo fueran también por el arte, habrían resultado del mismo modo que lo han hecho por naturaleza» [141].

Aquí encontramos una expresión clara y sin ambigüedades de la idea teleológica: el método de la naturaleza es el del artista y, a la inversa, el verdadero arte es imitación de la naturaleza. De acuerdo con ello, el científico ha de abordar su problema como lo hace el estudioso de la creación artística, el cual aprende, a partir de los detalles de la casa, las funciones asignadas a las distintas partes por el constructor, o que, a partir de la forma de una estatua, entiende lo que el artista desea expresar con ésta. Esta concepción de los fenómenos naturales como tendentes a un fin, puede ser fructífera y de gran valor como principio guía en aquellos sectores de la biología en que el objeto de investigación es el rol funcional de formas y procesos orgánicos, de ahí el gran éxito aristotélico en zoología y el valor perdurable de una gran parte de sus obras biológicas. Sus tratados sobre la morfología de los seres vivos pueden leerse como si hubieran sido escritos por uno de nuestros contemporáneos, mientras que el conjunto de su *Física* está impregnado por el espíritu de un mundo que nos es completamente ajeno y que comenzó a pasar de moda desde el momento en que la ciencia física abandonó el enfoque teleológico y reemplazó el «¿Con qué propósito?», por el «¿Cómo?».

El principio teleológico desempeñó un importante papel en la dinámica de Aristóteles y dado que esa teoría dinámica es una parte integrante de su imagen del cosmos, deberemos examinarla con cierta atención, lo que implicará la descripción de sus ideas principales sobre la estructura del universo.

Aristóteles se apropió de la teoría de los cuatro elementos y su división en pesados (tierra y agua) y ligeros (aire y fuego) procedente de la física presocrática. Ya los primeros filósofos pensaron que había una cierta distribución de los elementos en el cosmos: mientras la tierra y el agua estaban situados en la Tierra y alrededor de ella, el aire se encontraba en la región superior, y en la más alta

estaba el fuego, concentrado en las estrellas y, especialmente, en el Sol. Aristóteles tejió todas esas teorías al sistema de valores cósmicos ideado por Platón sobre la base de la antítesis entre el movimiento eterno y bien acompasado de los cielos y los movimientos irregulares y efímeros que ocurren sobre la Tierra. Aristóteles completaría esa antítesis subrayando la diferencia esencial existente entre la forma de los movimientos de las estrellas y la de la región inferior que se extiende de la Tierra a la Luna. Los movimientos celestes son circulares, mientras los de nuestra región son o más complejos —como la trayectoria de un proyectil— o adoptan la forma de una línea recta —como la trayectoria de los cuerpos que caen (piedras) o se elevan (vapor, llamas). Esta escala de valores cósmicos postulaba la prioridad de los movimientos celestes sobre los terrestres y la primacía del movimiento circular: «Puede ahora mostrarse de forma sencilla que la rotación es la locomoción primaria. Cada movimiento local —como se dijo antes— es o rotatorio o rectilíneo, o un compuesto de ambos y los dos primeros deben ser anteriores al último, ya que son los elementos de que éste consta. Además, el movimiento rotatorio es anterior al rectilíneo porque es más simple y completo, lo cual puede mostrarse como sigue: La línea recta atravesada en el movimiento rectilíneo no puede ser infinita, porque no existe una cosa tal como una línea recta infinita, e incluso si la hubiera, no podría ser recorrida por ninguna cosa en movimiento, ya que lo imposible nunca ocurre y es imposible recorrer una distancia infinita. Por otra parte, el movimiento rectilíneo en una línea recta finita sería, si volviese atrás en un movimiento compuesto, dos movimientos de hecho, mientras que si no lo hiciese, sería incompleto y perecedero y tanto en el orden de la naturaleza, por definición, como en el del tiempo, lo completo es anterior a lo incompleto y lo imperecedero a lo perecedero. Asimismo, un movimiento que admite el ser eterno es anterior al que no lo hace. Ahora bien, el movimiento rotatorio puede ser eterno, pero ningún otro, sea de locomoción o de cualquier otro tipo, puede serlo, ya que en todos ellos puede haber reposo y con el reposo perece el movimiento. Además, el resultado al que hemos llegado, que el movimiento rotatorio es simple y continuo y el rectilíneo no, es razonable. En el rectilíneo tenemos un punto de partida, un punto de llegada y uno medio, definidos... Por su parte, en el movimiento circular no hay tales puntos definidos, pues ¿por qué habría de ser un cierto punto de la línea el lí-

mite y no cualquier otro? Todo punto es tanto como cualquier otro el de partida, fin o medio» [152].

La mente sistemática de Aristóteles no le permite asociar ese movimiento geométrico eterno con una sustancia que la evidencia empírica muestra que se mueve en línea recta en la región sublunar, o sea, el fuego. Aunque está incluso de acuerdo en que el lugar del fuego está en las regiones superiores, mantiene que la sustancia de la que están hechas las estrellas es de tipo superior y la única capaz de moverse en un círculo; es decir, su forma natural de movimiento es circular. Esa noción de forma natural de movimientos está conectada con el concepto de lugar natural que discutiremos más adelante. Ahora bien, está claro que el lugar natural de la tierra y el agua es el centro del universo, en y sobre la Tierra. Del mismo modo, está claro que el lugar natural del aire y el fuego está en las regiones superiores. El resultado de todo ello es el movimiento natural que procede de la tendencia de los diversos tipos de materia que no ocupan su lugar natural a hacerlo, de su deseo de ocupar el lugar que les es propio en el cosmos, corrigiendo así cualquier desviación de lo que sería el orden perfecto. De este modo, los movimientos naturales se convierten en la manifestación dinámica de la obra teleológica en el universo físico.

A los cuatro elementos originales debe añadirse ahora un quinto que desde el punto de vista dinámico es simplemente una tercera categoría, ya que los otros cuatro se emparejan en dos tipos de movimiento natural: «Puede llegarse a la misma conclusión si se toma además como punto de partida el hecho de que todo movimiento es o natural o contrario a natura y que el movimiento que es antinatural para un cuerpo, es natural para otro, como es el caso del movimiento hacia arriba o hacia abajo, pues el que es natural para el fuego, es antinatural para la tierra y viceversa; de ahí se sigue que también el movimiento circular, por ser antinatural a los elementos que conocemos, será natural para algún otro. Y lo que es más, si el movimiento circular es el desplazamiento natural para alguna cosa, está claro que habrá, entre los cuerpos simples y primarios, alguno que se moverá naturalmente en círculo, como lo hace el fuego hacia arriba o la tierra hacia abajo... Si la materia transportada fuese —como algunos pretenden— el fuego, ese movimiento sería tan opuesto a su naturaleza como el movimiento hacia abajo...

Así, si razonamos apoyándonos en todas estas premisas, habríamos de convencernos de que existe, además de los cuerpos que nos rodean aquí abajo, algún otro cuerpo distinto y separado, de una naturaleza tanto más superior cuanto más alejado se halle del mundo sublunar... Parece que el nombre mismo del primer cuerpo ha sido transmitido hasta nuestros días desde el tiempo de los antiguos, quienes alimentaban concepciones idénticas a las nuestras... ellos, creyendo que el primer cuerpo era algo diferente de la tierra, el fuego, el aire o el agua, denominaron «éter» a la región más alta... Queda también claro por las razones aquí expuestas, que el número de los cuerpos considerados simples no puede ser mayor que el que hemos mencionado. El movimiento de un cuerpo simple ha de ser necesariamente simple y afirmamos que no hay más movimientos simples que el circular y el rectilíneo en sus dos tipos, el que parte del centro y el que se aproxima a él» [153].

Las últimas frases de este pasaje son típicas de la física de Aristóteles, una vez que se ha establecido una fórmula general, no cabe discusión alguna, todo queda definitivamente fijado, como, por ejemplo, que no hay lugar en nuestro cosmos para otro «cuerpo simple».

Podría decirse que también la física moderna procede de ese modo y que la transición a la mecánica relativista supuso una completa revolución mental porque las fórmulas de la física newtoniana se habían convertido en dogmas teóricos. Pero hay una diferencia esencial entre Newton y Aristóteles. Los experimentos desempeñan un papel mucho mayor en la física moderna, tanto como para ser desde entonces el árbitro y juez último de toda teoría. Así, la ciencia de nuestro tiempo ha asumido un carácter bastante más flexible y la constante reevaluación de sus fundamentos ha hecho posible un progreso continuado. Por su parte, el enfoque de Aristóteles no logró mantener el adecuado equilibrio entre inducción y deducción, dejándose dominar ampliamente por esta última. Su dogmatismo y la tendencia a clasificar todo a cualquier precio, petrificaron la ciencia privándole de flexibilidad y así, en ausencia del correctivo de las contrastaciones experimentales, bloqueó la vía para cualquier desarrollo ulterior. El producto epistemológico de este modo de pensar fue el que el experimento fuera considerado el culpable siempre que teoría y experimento entraron en conflicto.

Dado que las estrellas están formadas por un éter que tiene un movimiento natural circular, ¿cómo puede explicarse el calor del

Sol? La respuesta de Aristóteles a esta pregunta es muy clara: «El calor que ellos (los astros) emiten, así como la luz, nacen de la fricción violenta del aire producida por el movimiento de traslación de tales cuerpos. En efecto, el movimiento lleva naturalmente a la incandescencia a la madera, la piedra y el hierro, *a fortiori*, pues, llevará a un cuerpo más cercano al fuego, como es el aire. Compárese con el caso de los proyectiles de artillería: éstos se incendian al igual que las balas de plomo se funden, y si los proyectiles mismos se prenden fuego, el aire que los rodea debe necesariamente sufrir la misma modificación... En cuanto a los cuerpos altos, son transportados cada cual en su esfera, de ahí que no sean ellos los que se prenden fuego, sino que sea el aire que se encuentra sobre la esfera del cuerpo movido circularmente el que se caliente por efecto de la revolución de aquélla. Ese efecto se producirá principalmente en el lugar en que está fijado el Sol» [157].

Vamos ahora a volver sobre los otros dos movimientos naturales (hacia arriba y hacia abajo). Aristóteles consideró ambas direcciones como opuestos absolutos, en desacuerdo con Platón y otros que entendían que en un universo que posee un centro y un perímetro esférico, tales conceptos debían de ser relativos. Del mismo modo y haciéndolos corresponder a esos conceptos geométricos, Aristóteles convirtió «pesado» y «ligero» en absolutos. Este fue el origen de las antítesis aristotélicas que obstaculizaron la formación de la noción básica de «peso específico»: «Nuestro siguiente tópico será lo pesado y lo ligero, a propósito de lo cual habremos de examinar qué cuerpos lo son, cuál es su naturaleza y también por qué razón tienen esas peculiares potencias. El estudio de estos temas pertenece propiamente al del movimiento, ya que decimos que una cosa es pesada o ligera por su aptitud para moverse naturalmente de un cierto modo... Pesado y ligero se dicen en términos absolutos y relativamente a otra cosa. Así, decimos de muchas cosas que tienen peso, que unas son más ligeras que otras; por ejemplo, el bronce es más pesado que la madera. Nuestros predecesores han tratado esas cualidades en su sentido relativo, pero nada han dicho de ellas en sentido absoluto. En efecto, nada dicen sobre la pesantez o ligereza, sino que, entre las cosas pesadas, qué es más pesado y qué más ligero. Lo que sigue pone en claro lo que queremos decir. Por su naturaleza hay ciertas cosas que invariablemente se alejan del centro y otras que se dirigen

hacia él. De lo que se aleja del centro decimos que se dirige hacia arriba, y de lo que se aproxima hacia el centro, que se dirige hacia abajo» [163].

Aquí Aristóteles hace referencia al intento de Platón de diferenciar los distintos grados de pesantez en los cuerpos «pesados», es decir, en los cuerpos con tendencia natural hacia abajo. Teofrasto nos dice que Platón identificaba la pesantez con el peso: «El definió pesado y ligero no de modo absoluto, sino en relación a cuerpos tales como la tierra. Parecería que de tales cuerpos los pesados serían aquellos que son desplazados con dificultad a un lugar que no sea el propio, mientras que los ligeros se desplazan fácilmente» [137]. Puesto que «el lugar que no es el propio» de un cuerpo pesado es arriba, se sigue de ello que Platón descubrió un criterio simple y correcto para diferenciar pesos, concretamente elevar el cuerpo. Aristóteles, lejos de conceder especial importancia a esta definición, se felicitaba a sí mismo por haberse dado cuenta «de que lo pesado y lo ligero son absolutos» —una de esas teorías completamente infundadas que tanto daño hicieron al progreso de la física. Para él el establecimiento de esas antítesis absolutas era un gran logro porque completaban su teoría de la materia, construida sobre una combinación de opuestos. Habiendo rechazado las teorías monistas de los milesios y las escuelas atomistas en favor de los cuatro elementos de Empédocles con el añadido del éter «eterno», debía hallar un principio básico común a todos ellos que sustituyera la concepción monista que todo lo derivaba a partir de una sola fuente, y lo encontró en el principio de los opuestos que extrajo de las dos antítesis presocráticas, cálido/frío y seco/húmedo. A partir de todas las combinaciones posibles, él modeló los cuatro elementos de manera que proporcionaran las ecuaciones frío+seco=tierra, frío+húmedo=agua, caliente+húmedo=aire y caliente+seco=fuego. Las primeras dos ecuaciones dan lugar a la cualidad de lo «pesado», que es la opuesta a la cualidad de lo «ligero» a que dan lugar las otras dos. De este modo Aristóteles reemplaza los cuatro elementos por las cuatro cualidades, caliente, húmedo, seco y frío y, así, combinándolas e intercambiándolas con sus opuestas alcanza finalmente su meta, que era la de probar que los elementos tienen una fuente común y pueden transformarse los unos en los otros: «Sostenemos que el fuego, aire, agua y tierra son transformables unos en otros y que

cada uno está potencialmente latente en los otros como es cierto de todas las demás cosas que tienen un único substrato común subyacente en el que pueden en última instancia resolverse» [166].

En la segunda parte de su obra *De la generación y corrupción,* Aristóteles establece los principios básicos de su teoría de la materia. Allí explica la transición de un elemento a otro a partir del intercambio de factores cualitativos que se encuentran en una combinación dada. Obviamente el fuego es producido a partir del aire cuando la humedad se transforma en sequedad; la tierra a partir del fuego cuando el calor es reemplazado por el frío, y así sucesivamente.

Aristóteles examina de forma similar otros pares de opuestos como son duro-blando, áspero-suave, denso-raro, analizando el papel que desempeñan en la diferenciación de los cuerpos primarios.

La historia de la física ha probado que toda esta teoría de las cualidades opuestas de forma absoluta, incluso aunque sea presentada con la brillantez dialéctica de la forma tesis/antítesis, no conduce a ningún lado. Se ha mostrado que un método mucho más productivo para describir los fenómenos naturales es definir una cualidad física dada en términos de una escala continua de valores numéricos, pasando de un extremo a otro por gradaciones y desechando por completo la concepción de antítesis absolutas. El termómetro, por ejemplo, mide el grado de calor de un cuerpo bajo cualquier condición reduciendo, por tanto, toda antítesis subjetiva calor/frío a una escala de valores objetiva; lo mismo es aplicable al higrómetro que mide todos los grados de humedad, desde la máxima sequedad a la más extrema humedad. Duro y blando cesan de ser opuestos una vez que la dureza ha sido definida y construido un método de medida a partir de dicha definición capaz de situar a todo cuerpo en un cierto lugar de una escala continua de «grados de dureza», etc. En tiempos modernos la teoría de los opuestos condujo a la extravagancia de Goethe al intentar mantener en contra de Newton su propia teoría del color basada en la antítesis luz/sombra y no era mera casualidad que Goethe desaprobara una matematización de la naturaleza que implicaba el divorciar la descripción de ésta de la aprehensión subjetiva del hombre, ni es sorprendente que Hegel, que tan violentamente luchó contra los puntos de vista newtonianos, aprobase tan apasionadamente a Goethe y su definición del color como una síntesis de luz y oscuridad.

Volveremos ahora a nuestro problema principal, la dinámica de Aristóteles. El estudio de ese tema es en sí mismo la causa de la fama aristotélica, ya que él fue el único científico antiguo que trabajó sobre el desarrollo de una teoría cuantitativa o semi-cuantitativa en este importantísimo campo, y no era cosa fácil. Las mecánicas de Galileo y Newton nos han mostrado que los fenómenos dinámicos que parecen elementales a un lego son, de hecho, muy complicados. Ahora sabemos que el estudio de las leyes del movimiento es complicado por dos factores que no pueden neutralizarse fácilmente, la fricción y la resistencia del medio, debido a los cuales la velocidad de un cuerpo decrece constantemente después del aumento producido por el impulso inicial. Este hecho dio lugar a la concepción «pre-galileana» errónea de que el cuerpo había de estar sujeto a la acción de una fuerza constante a fin de mantener una velocidad constante; en realidad tal fuerza sólo sirve para superar las fuerzas contrarias de la fricción y la resistencia del medio. Si no fuera por esas fuerzas contrarias, la acción de una fuerza constante sobre un cuerpo incrementaría uniformemente su velocidad, mientras que la acción de una fuerza que sólo se aplicase al inicio del movimiento produciría el mantenimiento constante de la velocidad que dicho cuerpo hubiese adquirido en el momento en que la fuerza hubiera dejado de actuar sobre él. El problema se complica aún más por el hecho de que estamos dentro del campo gravitacional de la Tierra y, por tanto, si lanzamos un objeto, su trayectoria dependerá también de la fuerza de gravedad y asumirá la forma resultante de conjugar factores diversos, como la inercia del objeto, el efecto de la gravedad y la resistencia del aire.

Todos estos hallazgos de la física moderna son resultado del análisis experimental y teórico de los diversos factores intervinientes en el momento en que se produce el movimiento. Dado que Aristóteles no lo descompuso en sus elementos, no es sorprendente que sus leyes del movimiento no correspondan a los hechos: «Por tanto, si el motor *A* ha movido a *B* una distancia *C* en un tiempo *D*, entonces en el mismo tiempo la fuerza *A* movería ½ de *B* dos veces la distancia *C* y en ½ de *D* moverá ½ de *B* la distancia total *C*, de donde se sigue que las reglas de la proporción son observadas» [151]. En otras palabras, Aristóteles mantiene que la distancia recorrida por un cuerpo está en proporción directa a la fuerza —que actúa sobre él constantemente— y al tiempo transcurrido, mientras está

en proporción inversa a la masa del cuerpo. Pero la experiencia le mostraba que esta ley era sólo una burda aproximación y que, cuando la desproporción entre la fuerza y la masa es muy grande, fracasa rotundamente. Por ello consideró necesario adaptar su ley y proporcionar ejemplos empíricos en apoyo de esa modificación: «Pero si *E* mueve a *F* una distancia *C* en un tiempo *D*, no se sigue necesariamente que *E* pueda mover dos veces *F* la mitad de la distancia *C* en el mismo tiempo...; de hecho, podría muy bien ocurrir que no produjera movimiento alguno, porque no se sigue que si una determinada fuerza motriz da lugar a una cierta cantidad de movimiento, la mitad de esa fuerza dé lugar o a una cantidad concreta o en una duración temporal determinada; si fuera de otro modo, un hombre podría mover un barco, ya que tanto la fuerza motriz del velamen como la distancia que hace recorrer al barco son divisibles en tantas partes como hombres haya» [151]. En este pasaje oímos hablar a un Aristóteles totalmente diferente, un Aristóteles que está mucho más cercano a nosotros que aquel que dogmatiza sobre la estructura del cosmos y no duda un momento del poder analítico del intelecto puro. Aunque su ley del movimiento —citada antes— no es correcta, su formulación está emparentada en dos aspectos con el espíritu de nuestro propio tiempo: es matemática en su forma y su validez es calificada por referencia a la experiencia.

La ley del movimiento de Aristóteles se aplica a todo movimiento y no sólo al «natural», sino también al movimiento «violento» en dirección distinta a arriba y abajo. Igualmente, Aristóteles la formuló de nuevo al ocuparse del tema del movimiento natural, incluyendo, pues, en éste lo que nosotros llamamos el movimiento de caída libre. En ese caso —como en el del ascenso de los cuerpos «ligeros»—, la fuerza motriz es reemplazada por el peso y su opuesto aristotélico, la «levedad». Las diversas formulaciones muestran que también en ese caso Aristóteles tuvo cuidado de no infringir los principios de su ley general: «Cuanto mayor sea el cuerpo, más rápidamente realizará el movimiento que le corresponde» [158]; «cuanto mayor sea la cantidad de fuego o de tierra que se desplace, más rápido será su movimiento hacia su lugar natural» [156]; «una gran cantidad (de fuego) se elevará más rápidamente que una pequeña. De manera similar, un lingote de oro o de plomo grande, descenderá también más rápidamente que uno menor, y lo mismo sucede con todos los cuerpos pesados» [164].

Finalmente, y para completar el cuadro, citaremos la formulación cuantitativa: «Si un cierto peso se mueve una cierta distancia en un tiempo dado, un peso mayor se moverá la misma distancia en un tiempo más corto y según qué proporción mantengan los cuerpos entre sí, esa misma proporción mantendrán los tiempos; por ejemplo, si la mitad de un peso recorre una distancia en un tiempo *x*, ese peso íntegro la recorrerá en ½ *x*» [155]. La ley de Aristóteles para los graves dice, por tanto, que la velocidad del cuerpo al caer es proporcional a su peso y sería ampliamente conocida a través de las mortíferas críticas que Galileo le dirigió en su obra *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, publicada en 1638. Desde entonces ha sido uno de los fundamentos comúnmente aceptados de la mecánica, probado experimentalmente, el que la velocidad de caída es la misma para todos los cuerpos y no depende de su peso. Esta ley es verdadera literalmente sólo en el vacío pero las variaciones ocasionadas, por ejemplo, por la resistencia del aire, no son muy grandes, siempre que las alturas consideradas no lo sean ni los pesos sean muy pequeños. Ciertamente no existe nada semejante a la relación proporcional postulada por Aristóteles, y Galileo acertadamente se preguntaba si Aristóteles habría realizado alguna vez el experimento de ver «si una piedra que cae de una altura de 10 codos llega a tierra al mismo tiempo que otra piedra diez veces más pesada que cayera de una altura de 100 codos».

La crítica de Galileo a esta ley marcó un giro en la transición de física antigua a la moderna. Sin embargo, no nos basta con señalar el hecho de que Aristóteles estuviera equivocado, debemos examinar el problema con mayor detalle. El tema de las leyes de caída de los cuerpos cobra significado fuera de los estrechos límites de un movimiento específico en conexión con la rotunda negación del vacío aristotélico y con su opinión sobre la influencia del entorno sobre el movimiento. Está, por tanto, en estrecha relación con los principios básicos de su concepción del mundo físico.

Los fundadores de la escuela atomista —que constituyen el tema del siguiente capítulo— consideraron la existencia del vacío como condición necesaria del movimiento. Su concepción era radicalmente extrema: los elementos últimos de la materia deben estar separados entre sí por la ausencia de materia, es decir, por un vacío que no la contiene ni siquiera en su forma más rarificada, como puedan ser el aire o el éter. Cada átomo se mueve en el vacío hasta que colisiona

con otro átomo; así, en el mundo de los átomos toda actividad está configurada por movimientos en un vacío absoluto y por impactos de la materia en la materia. Esta concepción —una de las más penetrantes de la antigua Grecia— fue desarrollada básicamente a partir de una argumentación de carácter teórico y continuó sin ser confirmada experimentalmente hasta tiempos modernos. También el rechazo que de ella hiciera Aristóteles era teórico y una cuestión de principio, pero al menos las objeciones teóricas tienen más peso en términos de su concepción cósmica que el que tienen sus argumentos empíricos. El meollo de estos últimos es básicamente que los cambios de volumen de un cuerpo son el resultado de la contracción o expansión y no prueban la existencia del vacío, pues no tienen por qué entrar en conflicto con la continuidad de la materia. La contracción, por ejemplo, es explicada en función de la liberación del aire contenido en el cuerpo comprimido, y la expansión, en función de los cambios cualitativos que afectan a una sustancia continua, como es el caso de la evaporación.

Dado que la experimentación sistemática era muy imperfecta en el Mundo Antiguo, fue la discusión teórica —y no los argumentos empíricos— la que decidió los principios que habían de ser adoptados. Entre las muchas razones que Aristóteles esgrimió en contra de la existencia del vacío en la cuarta parte de su *Física,* la más característica de su modo de pensar es la siguiente afirmación: «El vacío, en tanto que vacío, no admite diferenciación alguna» [142]. Con ello quiere decir que no posee rasgos geométricos distintivos ni ninguna de las cualidades esenciales para la determinación de la dirección del movimiento; en un vacío no hay medios para la orientación espacial.

Aquí podemos hallar una analogía con la negación del movimiento absoluto en un espacio newtoniano. Si sólo hubiese un cuerpo en toda la vaciedad del espacio infinito no tendría sentido asignarle un lugar o estado de movimiento, para ello se requiere al menos dos cuerpos que definan así el movimiento relativo en un marco de referencia dado. Aristóteles no veía el modo de construir tal marco si los cuerpos estaban separados entre sí por el vacío. Puesto que no hay lazo geométrico que conecte a un cuerpo rodeado de vacío con otro, no tiene sentido señalar su estado ni en términos de lugar ni de movimiento.

Desde Newton los físicos se han formado en el hábito de considerar el espacio como una estructura geométrica desplegada en el vacío que liga entre sí los puntos geométricos en él sobreimpresionados. Aristóteles rechazó cualquier descripción física realizada a partir de una geometría abstracta que se extendiera más allá de los límites de la materia o en los vacíos entre sus partes. En su lugar identificó el espacio con el volumen ocupado por la materia, una identificación que requería la continuidad de aquélla. Es característica de esta concepción el que Aristóteles no hiciera uso de la palabra «espacio», sino de la palabra «lugar», para expresar la localización de un cuerpo dado. «Lugar» es un término mucho más concreto que «espacio», proporciona una definición geométrica de un cuerpo concreto en términos de los límites entre éste y su entorno material, es decir, entre éste y el cuerpo o cuerpos que están en contacto directo con toda su periferia.

La combinación aristotélica de geometría y materia para formar su concepto de lugar no es disimilar a la concepción del espacio en la Teoría General de la Relatividad. También ésta rechaza el retrato newtoniano del espacio como una especie de «caja» infinita en que se mueven los cuerpos físicos. En lugar de ello representa el espacio como un tipo de comunión del cuerpo y sus contornos: es el cuerpo el que determina la geometría de su entorno y ésta no puede ser artificialmente separada del cuerpo mismo. De ahí que un punto físico sea simplemente una singularidad en el «campo métrico» que le rodea y, de nuevo, este campo no es en modo alguno un espacio vacío, sino una especie de emanación de la materia que está en él, ni más ni menos que la materia es una cierta «materialización» del campo. El cosmos, tal y como lo concebimos hoy, es muy diferente de la «caja vacía» de Newton o de los atomistas griegos. El espacio interestelar está lleno de radiación electromagnética de todo tipo de longitud de onda, sus extensiones contienen campos gravitacionales y son atravesadas por ondas gravitatorias. Asimismo, hay campos de fuerza alrededor de los átomos de que están compuestos los cuerpos físicos y en los espacios intraatómicos o intranucleares hay, igualmente, una interacción de fuerzas que actúan entre las partículas elementales.

Esta semejanza entre la concepción aristotélica del problema del continuo espacial y la incorporada a la Teoría General de la Relatividad es muy interesante, pero debemos evitar el extraer conclusio-

nes precipitadas a partir de ella; su similaridad es sobrepasada por una diferencia fundamental: quienquiera que adopte la teoría de la relatividad puede en cada caso real volver sobre la teoría de Newton como una primera aproximación a la realidad, una aproximación que con frecuencia es más que suficiente para la descripción de los hechos. A pesar de las diferencias teórica y filosófica existentes entre la mecánica clásica y la nueva teoría, y a pesar de la diferencia de sus métodos matemáticos, la primera está incluida en la segunda como primera aproximación. La historia de la ciencia de los últimos trescientos años está caracterizada por una secuencia cronológica y casi orgánica en su desarrollo que no tiene parangón en la ciencia griega. Sobre todo es la historia de la física, de Galileo a nuestros días, la que nos hace conscientes de que la ciencia avanza hacia la realidad por medio —por así decirlo— de aproximaciones concéntricas en que cada teoría contiene a su predecesora como un «caso especial». Por otro lado, nada sirve de puente en el abismo que separa, por ejemplo, la concepción de Aristóteles de la anterior de Demócrito. Incluso podría decirse que, en conjunto, muchas de las ideas aristotélicas, en la medida en que uno puede admirar su agudeza científica, eran de naturaleza regresiva respecto a las de los antiguos atomistas, ya que impidieron el desarrollo de algunos profundos principios contenidos en la doctrina de estos últimos.

Debemos considerar el razonamiento de Aristóteles sobre los cuerpos que caen a la luz de su negación del vacío sobre la base de que éste impediría cualquier acción física. Apoyándose en su concepción teleológica, la tendencia de un cuerpo a volver a su lugar natural debe aumentar necesariamente conforme aumente su masa o, en otras palabras, la velocidad de un cuerpo «pesado» que cae debe aumentar con su peso y la velocidad de ascenso de un cuerpo «ligero» deberá aumentar con su «levedad». Esta conclusión puede encajar en su ley general del movimiento si se considera la «tendencia» de un cuerpo como la fuerza que le pone en movimiento: «Vemos que los cuerpos que tienen un mayor impulso —proceda del peso o de la ligereza—, siendo iguales a otro respecto, se desplazarán más deprisa sobre un espacio igual y lo harán en la proporción que mantengan entre sí sus magnitudes. De ahí que también deberían moverse a través del vacío con esa proporción de velocidad. Pero eso es imposible porque ¿por qué había de moverse uno más deprisa?... Todos deberían, por tanto, moverse con idéntica veloci-

dad. Pero eso es imposible» [145]. Aristóteles aplica aquí el principio de ausencia de razón suficiente al vacío que no permite diferenciación alguna. De este modo llega al rechazo de una conclusión que hoy sabemos correcta, concretamente la de que en el vacío todos los cuerpos caen con la misma velocidad.

La negación del vacío es tan importante para Aristóteles como para discutir la cuestión una y otra vez desde ángulos diferentes: «Todo movimiento es o bien violento o acorde a naturaleza, y si hay movimiento violento, debe también haber natural, pues el movimiento violento es contrario a naturaleza y el movimiento contrario a la naturaleza es posterior al acorde a la naturaleza, de modo que si cada uno de los cuerpos naturales no tiene un movimiento natural, ninguno de los otros tipos de movimiento puede existir. Pero ¿cómo va a haber movimiento natural si no hay diferenciación en el vacío o el infinito? Pues en tanto que infinito no tendrá arriba, abajo o en el medio, y en tanto sea vacío arriba no difiere una pizca de abajo, ya que si no hay diferencia alguna en lo que es nada, nada habrá en el vacío (pues el vacío parece ser una no-existencia y una privación del ser); mas el movimiento local natural parece estar diferenciado, de modo que las cosas que existen naturalmente deben estar diferenciadas. Así, o nada tiene un movimiento local natural o si no, no hay vacío» [143].

El ejemplo más común de movimiento «violento» es la trayectoria de un proyectil. Ya que en este caso la fuerza motriz actúa aparentemente sólo en el momento del lanzamiento, Aristóteles sostiene que el cuerpo es mantenido después en movimiento por el entorno, es decir, el aire: «De acuerdo con los hechos, las cosas que han sido lanzadas se mueven aunque aquello que les dio su impulso no las esté tocando, bien sea en razón de su sucesivo reemplazamiento —como algunos mantienen— o porque el aire que ha sido impulsado las empuja con un movimiento que es más rápido que el movimiento local natural del proyectil por el cual se mueve hacia el lugar que le es propio. Pero en un vacío nada de esto podría suceder ni puede nada ser movido a menos que se mueva como aquello que es transportado» [143]. Resumiendo sus argumentos, Aristóteles menciona —sólo para rechazarla— una conclusión que es de hecho una formulación explícita de la ley de inercia de Galileo: «Y lo que es más, nadie podría decir por qué una cosa una vez puesta en movimiento habría de detenerse en algún sitio, porque ¿por qué habría de dete-

nerse aquí en lugar de allá? De modo que una cosa o estará en reposo o se moverá *ad infinitum* a menos que algo más fuerte se interponga en su camino» [143].

Aristóteles, sin embargo, no se contenta con examinar el problema desde un solo lado. En el caso del lanzamiento de un proyectil hizo hincapié en el papel coadyuvante desempeñado por el entorno, sin el cual es incapaz de explicar cómo puede haber movimiento sin impulso aparente e igualmente en el caso de la caída señaló el entorno como factor retardatorio manteniendo de nuevo una teoría que es insostenible en la experiencia (la velocidad de caída está en proporción inversa a la densidad del medio resistente), que también le condujo a la conclusión de que es imposible el vacío. «La verdad de lo que aseveramos es además patente a partir de las siguientes consideraciones. Vemos a un mismo peso o cuerpo moviéndose más rápidamente que otro por una de dos, o porque hay una diferencia en aquello a través de lo cual se mueve —como la hay entre el aire, el agua y la tierra— o porque siendo igual todo lo demás, el cuerpo que se mueve difiere del otro en cantidad de peso o ligereza. Así, el medio provoca una diferencia porque se interpone al móvil, sobre todo si se mueve en oposición a él, pero incluso lo hace en menor grado si está en reposo, más aún si se trata de un medio que no es fácilmente divisible, es decir, un medio que es denso en cierta medida. De este modo, *A* se moverá a través de *B* en un tiempo *C* y a través de *D*, que es más tenue, en un tiempo *E* (siendo la longitud de *B* igual a la de *D*) proporcional a la densidad del cuerpo interpuesto. Porque sea *B* agua y sea *D* aire, entonces en la medida en que el aire es más tenue e incorpóreo que el agua, *A* se moverá a través de *D* más rápidamente que a través de *B*. Sea ahora la velocidad de un movimiento proporcional a la razón de las densidades del agua y el aire, entonces, si el aire es dos veces más tenue, el cuerpo atravesará *B* en un tiempo doble a aquel en que atraviesa *D* y el tiempo *C* será doble del tiempo *E*. Así también en la medida en que el medio sea más incorpóreo y menos resistente y más fácilmente divisible, más rápido será el movimiento. Ahora bien, no hay una medida en que el vacío sea excedido en densidad por un cuerpo, como no hay proporcionalidad entre la nulidad y la cantidad... De igual manera, lo vacío no puede guardar proporción alguna con lo lleno, ni por tanto lo hará el movimiento a través del uno o el otro, pero si una cosa se mueve a través del más tenue de los medios

una cierta distancia en un cierto tiempo, a través del vacío se mueve con una velocidad más allá de cualquier medida» [144].

La negación del vacío es, por tanto, el resultado extraído a partir del absurdo de la conclusión de que la velocidad de caída en el vacío debería ser infinita. Aristóteles llega a ella considerando la «transición del límite» entre un medio de densidad finita y otro de densidad nula. Toda la concepción aristotélica de la naturaleza del «lugar» excluye la posibilidad física de una tal transición; al igual que la división de un cuerpo o de una sección es un proceso infinito, ilimitado, así también el proceso de rarificación nunca tiene fin y un abismo separa el medio más rarificado imaginable del vacío. El primero siempre permite la existencia de dirección y movimiento, mientras en el vacío no tienen sentido.

Si el cosmos es un continuo perfecto, será una única entidad. Así, mientras que asume la posibilidad del infinito en la división —de hecho su concepción del continuo le obliga a adoptar tal idea—, lo niega en la extensión. El cosmos es, pues, finito. Más aún, puesto que la exigencia de perfección requiere que sea esférico y los fenómenos astronómicos así lo prueban, el cosmos es una esfera finita con la Tierra en su centro y la esfera de las estrellas fijas en su límite. La finitud del cosmos es también consecuencia del movimiento circular, pues en otro caso estaríamos obligados a admitir una velocidad infinita: «Además, si el cielo es infinito y se mueve circularmente, atravesaría una distancia infinita en un tiempo finito. Supongamos, pues, un cielo inmóvil e infinito, y otro cielo movido en el interior de éste e igual a él; tras una revolución, el segundo —que es infinito— ha recorrido en un tiempo finito una distancia infinita igual a sí mismo. Pero eso, como sabemos, es imposible» [154].

La idea de que el cosmos es finito es un corolario de la dinámica de Aristóteles y de su concepción del lugar natural. Del mismo modo que los cuerpos ligeros tienden hacia los límites del cosmos, así también los pesados tienden hacia el centro, que es su lugar natural, y sólo un cuerpo finito puede tener un centro. Más aún, puesto que la Tierra misma está compuesta de elementos pesados, los cuerpos pesados tenderán hacia el centro de ésta, lo que implica que, a este respecto, se identifica con el centro del cosmos y por todo ello está claro que la Tierra ha de estar en un estado de absoluto reposo.

El que el orden del cosmos, y especialmente los movimientos circulares de las esferas celestes y de las estrellas encajadas en ellas,

sean eternos, hace que el cosmos mismo sea eterno. A diferencia de los filósofos presocráticos, Aristóteles rechaza la idea de creación, pues lo que fue creado perecerá algún día; la eternidad del cosmos se extiende, por tanto, en las dos direcciones temporales, el pasado y el futuro. Aunque no sea explícito va de suyo el que Aristóteles critica a Platón por basar su cosmología en la creación del mundo al tiempo que mantiene que perdurará por los siglos de los siglos. Las dos grandes escuelas filosóficas que surgieron tras Aristóteles no sostuvieron sus ideas sino que, al contrario, volvieron a la noción de un desarrollo cósmico, con lo que la teoría aristotélica de la eternidad del cosmos siguió siendo una opinión personal y única durante la antigüedad.

Los dos fundamentos de la filosofía natural aristotélica fueron desarrollados y modificados en la física de los estoicos a lo largo de los dos siglos que siguieron a la muerte del Estagirita. La concepción teleológica aparecía en esa doctrina en su forma más estrechamente religiosa, como Providencia, concepto que conserva el supuesto de que todo tiende a lo mejor y complementa así, y suaviza, el rigor desmesurado de la noción estoica del hado, es decir, del gobierno absoluto de la causalidad. La imagen continuista del cosmos adoptó su forma más dinámica en la escuela estoica, emergiendo como la doctrina de que todas las partes del cosmos son interdependientes y de que es dicha interdependencia la que hace del cosmos el escenario de una actividad física que le permea y une en un todo dinámico. Los supuestos de Aristóteles acerca de la finitud del cosmos y su negación absoluta del vacío no serían, sin embargo, aceptados en su integridad hasta la Edad Media. Los estoicos postularon la existencia de un vacío infinito que rodeaba al continuo finito del cosmos, mientras Epicuro y su escuela mantuvieron y desarrollaron la teoría de Leucipo y Demócrito acerca de la estructura atómica de la materia y las extensiones infinitas de vacío contenidas en el espacio situado entre los átomos y fuera de éstos. Esta desviación de la concepción aristotélica, aunque no perduró, provocó, sin embargo, un cambio de opinión sobre los cuerpos que caen. Más adelante veremos cómo los epicureístas sostuvieron que los átomos caen a través del vacío con la misma velocidad, independientemente de su peso, y cómo uno de los últimos comentaristas de Aristóteles, Filopón —que vivió a comienzos del siglo VI d.C.—, muestra su desacuerdo con el argumento de que en ausencia de un medio retardante la veloci-

dad de caída llegaría a ser infinita. La actitud de Filopón hacia la dinámica de Aristóteles es crítica de cabo a rabo y sería la última voz disonante en los mil años que precedieron a Galileo. De hecho, algunos de sus razonamientos, especialmente sus reflexiones acerca de la conexión de los descubrimientos de Aristóteles con la experiencia, podrían muy bien servir de introducción a la polémica galileana.

Existen diversos indicios de que en el período helenístico se dejó sentir una actitud crítica hacia varias de las ideas básicas de Aristóteles. Por señalar un ejemplo, es patente que a partir de una de las obras de Plutarco que trata de las propiedades físicas de la Luna, conceptos aristotélicos fundamentales, como el de lugar natural o movimiento natural, habían comenzado a ser desafiados hacia los inicios de la era cristiana, apareciendo los primeros indicios de una concepción del movimiento que se acerca a la nuestra, especialmente por la resolución de éste en sus componentes y por su recurso a analogías empíricas. Esta tendencia se vería alentada por varios factores, además de por las escuelas epicúrea y estoica —esta última en la medida en que se desvía de Aristóteles. Lo primero que ha de tenerse en cuenta es el progreso alcanzado por la astronomía en los siglos III y II a.C., progreso que condujo al descubrimiento de hechos completamente desconocidos para Aristóteles, como la precesión de los equinoccios. Este descubrimiento de Hiparco añadía a los movimientos cíclicos de los cielos uno nuevo no mencionado en el cosmos aristotélico, hecho que sin duda era suficiente en sí mismo para conmover la fe inquebrantable en la validez del método y la autoridad del Estagirita.

Un efecto similar —que no puede ser olvidado— fue el producido por el desarrollo de la balística y la mecánica aplicada que siguió a la expansión del Imperio romano y al incremento de su poder militar. El estudio de la trayectoria de los proyectiles condujo a una mayor comprensión de las leyes de la dinámica, llegando a ser claro que el momento de los misiles dependía sólo de la fuerza que les era aplicada en el instante de la descarga y que la teoría de Aristóteles del impulso impartido por el aire a la piedra durante su vuelo, era errónea. Filopón demostró esto explícitamente y sus descubrimientos se añadieron sin duda a la investigación empírica del largo período que comienza con Arquímedes y los primeros desarrollos de la técnica de las máquinas de guerra. Filón de Bizancio, Herón de Alejandría y el romano Vitrubio, tenían ese modo de ver las cosas

de los auténticos ingenieros. Así, mejoraron sus máquinas siguiendo métodos empíricos tales como el estudio de la fricción y los ensayos para reducirla, o el análisis de la conexión existente entre las fuerzas aplicadas y los movimientos de ellas resultantes. Al hacerlo, establecieron los principios básicos que subyacen a las máquinas más simples, así como algunas de las leyes fundamentales del movimiento —como la ley del paralelogramo de las velocidades. A consecuencia de todos esos logros la dinámica de Aristóteles fue resituada en la correcta perspectiva histórica, como una teoría que fue importante al comienzo de un largo desarrollo, aunque algunos de sus conceptos se probaran luego erróneos gracias al experimento.

La teleología de Platón y Aristóteles tampoco se mantuvo libre de críticas ni siquiera en el Mundo Antiguo. La teoría atomista de Demócrito —que pasaría a formar parte de la doctrina epicúrea— estaba basada por entero en un enfoque no-teleológico. Sin embargo, la escuela epicureísta tuvo una influencia mucho menos duradera que su rival, la escuela estoica —que sí mantenía la concepción teleológica.

Otro brillante crítico del teleologismo fue el gran discípulo de Aristóteles y fundador de la botánica sistemática, Teofrastro. En su *Metafísica* Teofrastro discute la idea de que los movimientos celestes son fenómenos especiales, esencialmente diferentes de los terrestres, entre los que se incluyen los referentes a los seres vivos: «El movimiento es una característica de toda la naturaleza y especialmente de los cielos. De este modo, si actividad es la esencia de todas y cada una de las cosas, cuando estén activas se moverán, como es el caso de las criaturas vivas y las plantas (si fuera de otro modo sus nombres serían homónimos), y por tanto está claro que también pertenece a la esencia de los astros el girar, ya que si estuvieran separados y en reposo, sus nombres deberían ser homónimos (pues el girar del cosmos es un modo de vida)» [175]. Con ello Teofrastro está desafiando la teoría aristotélica de que las esferas celestes son entidades «divinas» capaces de mantener el movimiento eterno de las estrellas sin un impulso exterior.

A pesar de su posicionamiento anti-mecanicista, Teofrastro aúna aquí sus fuerzas al as de los atomistas, que consideraban el movimiento como uno de los componentes primarios del universo, al igual que la materia, por el que es inútil preguntarse. Esta crítica condujo a Teofrastro a algunas reflexiones generales sobre el princi-

pio teleológico: «Por lo que respecta a la opinión de que todo tiene un propósito y nada ocurre en vano, en primer lugar la definición de ese propósito no es sencilla —como frecuentemente se ha dicho—, pues ¿dónde deberíamos comenzar y dónde parar? Y lo que es más, no parece ser cierto de varias cosas, algunas de las cuales se deben al azar y otras a una cierta necesidad, como vemos que sucede en los cielos y en varios fenómenos terrestres» [175].

Teofrastro procede a continuación a enumerar ejemplos del reino orgánico y el inorgánico que desde todo punto de vista parecen carecer de propósito y arrojan por tanto dudas sobre la existencia de cualquier tendencia a la bondad y la perfección.

No obstante, las críticas de Teofrastro, demoledoras como eran, pese a la cautela de su formulación, no sólo no lograron eliminar el punto de vista teleológico, sino que aparentemente no lograron ni tan siquiera perturbarlo de modo perceptible. Al final el cosmos de Aristóteles continuó dominando el pensamiento humano durante las épocas antigua y escolástica hasta llegar al siglo XVI. Y no debe sorprendernos que así fuera una vez visto que estaba eminentemente capacitado para mantener posiciones en el Mundo Antiguo y después de la aparición de la Cristiandad.

En la filosofía de Aristóteles el cosmos es una sublime manifestación del gobierno del orden en el universo. Esta idea se adaptaba tan perfectamente a la mentalidad griega en que el concepto de orden iba ligado a los de belleza y perfección —tal como se expresan en la creación artística—, como lo hacía también al credo básico de las religiones monoteístas para el que el orden es obra del Creador y expresión de su Voluntad.

La idea teleológica perduró, por tanto, como un principio guía en la explicación de la naturaleza, siendo encajado en el complejo del pensamiento religioso medieval. Y del mismo modo le fue asegurada larga vida a la antítesis aristotélica entre cielo y tierra al estar firmemente enraizada en el culto a los astros, del que pueden encontrarse vestigios a lo largo de toda la era griega. En la teología de las religiones monoteístas esa antítesis reaparecería luego con la localización de Dios y sus ángeles en los cielos, en la región pura de los movimientos eternos aristotélicos.

Capítulo V

EL MUNDO DEL ATOMO

«Tsaw latsaw, tsaw latsaw / quaw laquaw, quaw laquaw / zer sham, zer sham.»

Is. 28.10

La ciencia de la Antigua Grecia muestra en todas las etapas de su desarrollo el intento, continuamente recurrente, de resolver la antítesis entre la unidad del cosmos y la pluralidad de sus fenómenos. ¿Es real dicha antítesis? ¿o es quizá tan sólo una ilusión producto de la imperfección de nuestros sentidos?; y si así fuera, ¿cómo sucede eso? La pluralidad de los fenómenos ¿es sólo aparente y de hecho el cosmos es una única e inmutable unidad que no admite movimiento alguno? o¿ es esa unidad la imaginaria y de hecho la realidad no es más que la suma total de mutaciones y cambios sin fin?

Las respuestas dadas a estas cuestiones por los primeros filósofos griegos van de un extremo a otro. Tales y sus seguidores sostuvieron un punto de vista monista, derivándolo todo a partir de la materia primordial y Parménides de Elea llevó luego ese monismo hasta el extremo de desterrar el cambio y cualquier posibilidad de movimiento. En el otro extremo hemos visto en la teoría de los cuatro elementos de Empédocles el comienzo de una concepción pluralista que Anaxágoras llevó a su conclusión lógica con su conjetura de que pese a que la materia sea continua, consiste realmente de cantidades diminutas de cuantas diferenciaciones es capaz; en otras palabras, la pluralidad de los fenómenos cósmicos es el resultado de la plura-

lidad de las cualidades contenidas en cada una de las partículas de materia.

De todas las respuestas, la dada por los atomistas griegos, al ser una síntesis de elementos monistas y pluralistas, es la más convincente tanto por su simplicidad como por su comprensividad, mostrando que la pluralidad y el flujo del macrocosmos pueden ser explicados a partir de una cierta uniformidad y de leyes causales que gobiernan el mundo inaccesible a nuestros sentidos.

Todo lo referente a la antigua hipótesis atomista es especialmente interesante para quienes vivimos en la era moderna de la teoría atómica. La estructura atómica de la materia ha sido probada hoy mediante experimentos y constituye para nosotros un hecho firmemente establecido e incuestionable. La historia de los últimos ciento cincuenta años nos enseña cómo sólo lentamente emergió esa certeza y cómo lo hizo a partir de conjeturas generales —cuya realidad era vista con escepticismo por muchos científicos— y de una larga serie de experimentos y deducciones interrelacionados que, de repente, se convirtieron en una teoría uniforme y completa.

A la luz de ese desarrollo moderno es interesante preguntarse hasta qué punto los griegos, en una época en la que la experimentación sistemática es prácticamente desconocida, en que los métodos empleados consistían básicamente en la observación y la suposición especulativa y en la que los principios e inferencias científicas al uso eran escasas y en su mayor parte de naturaleza general, lograron un éxito. No se trata aquí de comparar las dos teorías en términos de logros científicos absolutos, pues tal comparación carecería de sentido sin duda, además de ser inadecuada. El objetivo fundamental de la comparación es, por el contrario, estimar la validez de un método tal como se manifiesta en su lógica interna y en la medida en que consiguió desarrollar por entero sus premisas en una época en que la evidencia científica era cualitativa en lo fundamental. Pues hemos de tener presente que los antiguos griegos apenas conocieron la experimentación y la deducción matemática como medios de aplicar a la realidad la intuición científica; para ellos, la analogía y el modelo eran los únicos lazos tendidos entre lo invisible y lo visible.

La historia de la antigua teoría atómica se extiende a lo largo de cuatrocientos años y está ligada a cuatro nombres famosos. Su autor fue Leucipo de Mileto, quien vivió alrededor de la mitad del siglo V a.C. Discípulo suyo fue Demócrito de Abdera (nacido hacia

el 460 a.C.), uno de los pensadores más universales del Mundo Antiguo. La teoría fue transformada en un sistema filosófico por Epicuro de Samos (341-270 a.C.), quien hizo así que fuera generalmente conocida. Finalmente debemos mencionar al poeta romano T. Lucrecio Caro (muerto hacia el 55 a.C.), cuyo poema didáctico *De Rerum Natura* es un peán en honor de la filosofía epicúrea. Pero ese poema es, también, la fuente más detallada de nuestro conocimiento de la teoría atómica de Epicuro, junto a la carta de éste a su discípulo Herodoto.

De los numerosos escritos de Demócrito sólo se han conservado unos pocos fragmentos y aún menos se conserva de Leucipo, aunque un importante número de sus enunciados son citados por Aristóteles y Teofrastro a lo largo de su dura polémica contra la teoría atómica. Esas citas, junto con algunas de Plutarco y junto a la literatura doxográfica, completan nuestra imagen de la teoría desarrollada por los fundadores de la escuela atomista.

Algunos de los detalles en que difieren Leucipo, Demócrito y Epicuro merecen una especial atención como indicativos del desarrollo teórico interno de una particular teoría científica, pero, en general, puede decirse que los principios de la teoría atómica son los mismos en todos sus proponentes. Todos esos pensadores subrayaron frecuentemente la idea de que en la naturaleza existe una conformidad general a la ley y, en concreto, que hay una ley que podría ser llamada «ley de conservación de la materia».

Suele citarse a Leucipo diciendo que «nada sucede por azar; todo ocurre de acuerdo a razón y por necesidad» [70], y la doctrina atómica de Demócrito incluye el enunciado «Nada puede ser creado de la nada, ni puede ser destruido y reducido a nada» [92]. Ese énfasis en la conservación de lo que existe es importante en la prueba de la existencia de átomos, como opuesta a la teoría de que la materia es infinitamente divisible. Es sabido que Leucipo fue en tiempos discípulo de la escuela eléata, la cual incluía a Zenón de Elea, cuyas famosas paradojas dan cuenta del ingenio de los mejores filósofos griegos. Algunas de éstas —sobre las que volveremos más adelante— están basadas en el principio de dicotomía o partición y el argumento consiste en afirmar que no hay fin para la división o sección en partes, del mismo modo que no hay límite para ninguna de las formas de la división matemática —incluyendo la partición en mita-

des—, de tal modo que el número de puntos entre dos dados, es infinito.

Es muy probable que una de las razones de Leucipo para intentar dar una solución al problema de la conservación de la pluralidad fuese precisamente la paradoja de la división. Y esto le condujo a la conclusión de que la división física no es igual a la matemática: «Los atomistas mantienen que la partición acaba cuando se alcanzan las partículas indivisibles y que no continúa al infinito» [93]. El supuesto de un límite inferior a la división de la materia es un axioma que puede apoyarse en argumentos de plausibilidad como el siguiente: si la materia puede ser infinitamente dividida, estará también sujeta a una desintegración completa de la que no puede volver a reintegrarse jamás. En otras palabras, si queremos mantener la ley de conservación de la materia y considerar el proceso de su desintegración y reintegración como reversible, hemos de asumir que la fragmentación o disgregación se detiene en un punto definido y finito. Sólo así quedará un cimiento permanente y primario para una nueva construcción, a partir de las partículas últimas, sin que haya pérdida de la cantidad de materia. De ahí que en su carta a Herodoto diga Epicuro: «Por tanto, no sólo debemos desechar la división en partes cada vez menores hasta el infinito a fin de no debilitar cuanto hay y vernos así compelidos en la composición de los agregados a apelotonar y derrochar las cosas ya existentes reduciéndolas a no-existentes...» [180].

Como corolario a esa insistencia sobre la realidad de los átomos, Epicuro subraya también la de un límite superior para el tamaño de éstos, pues siempre son invisibles y un átomo visible sería inconcebible. Aunque no se da ninguna razón específica para tal suposición, su base empírica es suficientemente obvia: los cuerpos que pueden ser vistos son siempre divisibles y, por tanto, no pueden ser átomos. Contrariamente a Demócrito, que no postulaba un tamaño máximo para el átomo, parece ser que Epicuro desarrolló la teoría de que lo perceptible y lo imperceptible constituyen dos categorías esencialmente distintas de la existencia.

La teoría atómica fue completada con un segundo axioma, la postulación de un "vacío", introducido con rigurosa consecuencia en la imagen del cosmos como una realidad independiente. De nuevo este supuesto se apoya en la plausibilidad: dado que la materia está compuesta de átomos, de partículas últimas, inmodificables, todos

los cambios deben ser el resultado de sus movimientos y prerrequisito para éstos es el vacío, un espacio completamente carente de materia por el que una partícula pueda desplazarse de un lugar a otro: «Pues si no hay un vacío que exista separadamente por sí, 'lo que es' no puede moverse, ni podría, además, haber una pluralidad si no hay algo que mantuviese las cosas separadas» [71]. De ello se sigue necesariamente que no hay posibilidad alguna de que haya un vacío dentro del átomo mismo ya que, en tal caso, éste podría verse sujeto a cambios y al influjo físico desde el exterior y, por tanto, podría ser desintegrado. De ahí que la postulación de un vacío como prerrequisito del movimiento de los átomos conduzca inevitablemente a la postulación de la solidez absoluta del átomo mismo. Materia y vacío son absolutamente distintos entre sí, o en palabras de Aristóteles al resumir: «Leucipo, en cambio, creyó contar con argumentos que, al tiempo que concuerdan con los datos de la sensación, no anulan la generación ni la corrupción, ni el movimiento, ni la pluralidad de los entes. Pero al mismo tiempo concedió a los monistas que no puede haber movimiento en ausencia de vacío. El resultado de todo ello es una teoría que afirma lo siguiente: El vacío es un 'no ser' y ninguna porción de 'lo que es' es un 'no-ser', pues lo que 'es' en el sentido estricto del término, es un absoluto pleno. Sin embargo, dicho pleno no es 'uno', sino que por el contrario es 'plural', infinito en número e invisible debido a su diminuto tamaño. Lo 'plural' se mueve en el vacío —porque hay un vacío— y reuniéndose produce el 'llegar-a-ser', mientras que al separarse produce la 'destrucción'» [72].

Todos los atomistas —de Leucipo a Epicuro y los discípulos de éste— coincidían en que tanto el número de los átomos como la extensión del universo eran infinito. La infinitud del cosmos en el tiempo, es decir, su eternidad, era deducida por Demócrito a partir de la conservación de la materia, la cual destierra cualquier *creatio ex nihilo:* «Demócrito de Abdera dijo que no hay fin para el universo, dado que no ha sido creado por poder exterior alguno» [94]. De otro lado, la infinitud del espacio y de la cantidad de materia que en él se encuentra, están claramente interrelacionadas. Podría parecer que la cuestión esencial en ambas premisas es la asunción de que el espacio es infinito, y de hecho Epicuro es explícito al manifestarlo: «Además el universo es ilimitado, porque aquello que está limitado tiene un punto extremo y tal punto extremo ha de consi-

derarse por referencia a algo más. Así que si no hay punto extremo, no hay límite, y si no tiene límite ha de ser ilimitado, que no limitado. Más aún, el infinito es ilimitado tanto en el número de los cuerpos como en la extensión del vacío; pues si, en un caso el vacío fuera ilimitado y los cuerpos en cambio limitados en número, éstos no podrían estar en parte alguna sino que serían arrastrados y dispersados por el vacío infinito por no haber otros cuerpos que los sostuviesen y retuvieran en sus posiciones mediante colisiones. Mas si, por el contrario, el vacío fuera limitado, el número infinito de los cuerpos carecería de espacio en que situarse» [176].

Hemos de hacer notar dos cosas en ese pasaje. La infinitud del universo se prueba mediante un argumento geométrico del mismo tipo del que es rechazado por los atomistas cuando es aplicado a la división de la materia. En este caso el argumento se considera válido porque el problema de que aquí se trata tiene que ver con cualidades espaciales. Hasta que en tiempos modernos se descubrieran los espacios no-euclidianos y sus propiedades, resultaba razonable rechazar la idea de un espacio finito sobre bases como las aquí expuestas por Epicuro. Digno de mención es también el que su argumento para probar la imposibilidad de una concentración de una cantidad finita de materia en un espacio infinito haya sido también utilizado en la controversia cosmológica moderna.

El universo de la escuela atomista consistía, pues, en un vacío de extensión infinita lleno de 'partículas sólidas', átomos, en número infinito. ¿En qué diferían esos átomos unos de otros? Ciertamente no en la materia que los conforma, porque eso contravendría las bases monistas de la teoría. No, la materia primordial de que están hechos los átomos es uniforme; pero hay varios tipos de átomos que se diferencian por sus formas: «Los átomos no difieren, en efecto, salvo por sus formas, pero su naturaleza —dicen— es única, como si cada uno fuese una porción de oro» [73]. También se nos dice que: «Leucipo y Demócrito, por su parte, afirman que todos los demás cuerpos están compuestos de corpúsculos indivisibles, que éstos son infinitos en número y en formas, y que los cuerpos difieren unos de otros en virtud de la posición y ordenación de sus componentes» [74]. Las cualidades físicas, concretas, de los cuerpos macroscópicos vienen por tanto determinadas, por el tipo peculiar o combinación de tipos, de sus átomos componentes, así como por diversos principios que controlan las disposiciones de esos átomos

en el espacio ocupado por el cuerpo y definidas como 'posiciones' y 'agrupamientos'.

La forma del átomo corresponde al elemento químico de la moderna teoría atómica; es su forma la que diferencia los átomos en el mismo sentido en que el número atómico lo hace hoy, determinando sus propiedades químicas. Puesto que la antigua teoría fue erigida sobre concepciones puramente mecánicas, no resulta sorprendente que los signos distintivos de los átomos fueran mecánicos o geométricos: «Tienen todo tipo de formas y aspectos y diferentes tamaños... Algunos son rugosos, otros tienen forma de gancho, unos son cóncavos, los otros convexos y algunos poseen otras innumerables variantes» [95].

De acuerdo con los pasajes citados anteriormente, Leucipo y Demócrito mantenían que el número de las formas posibles era infinito, mientras que para Epicuro es finito. Esa diferencia, naturalmente procede de la existente en los supuestos acerca del tamaño de los átomos; para cada tamaño dado es posible asignar sólo un número finito de formas claramente diferentes y, una vez que todas las posibles mutaciones han sido consideradas, cualquier nueva forma únicamente podría surgir del incremento en el volumen del átomo. De ahí que los primeros atomistas, que no fijaron un límite superior al tamaño del átomo, no restringieran tampoco el número de sus posibles formas. Pero Epicuro, por haber estipulado que el tamaño debía ser invisible, se veía obligado a reducir las formas a un número finito: «Además, los cuerpos sólidos e indivisibles a partir de los cuales se forman los compuestos, y en los que éstos se resuelven, tienen un inabarcable número de variedades en sus formas, pues no es posible que tan gran diversidad de cosas surgiera de las mismas formas atómicas si éstas fuesen limitadas en número. Y así, para cada forma, los átomos son infinitos en número, pero no lo son sus diferencias, sino tan sólo inabarcables» [176]. Y Lucrecio, que repite casi palabra por palabra esa afirmación sobre la finitud de las formas atómicas, proporciona una imagen enormemente vívida de cómo el incremento en el número de las formas está ligado al aumento del tamaño de los átomos.

Aparentemente, Leucipo distinguía sólo tamaño y forma en los átomos, y aunque por su parte Demócrito menciona el peso, no lo hace sin embargo como una cualidad independiente, sino como una función del volumen del átomo: «Demócrito afirma que 'cada indi-

visible es más pesado cuanto mayor sea su preeminencia en el tamaño'» [96] —y «preeminencia» refiere aquí al volumen atómico, a la extensión espacial.

Es en este punto donde aparece un cambio fundamental en la doctrina de Epicuro: «Demócrito reconocía sólo dos propiedades básicas en el átomo: el tamaño y la forma; pero Epicuro añadió una tercera, a saber, el peso..., pues, según él, los cuerpos primarios se mueven necesariamente gracias a la fuerza del peso» [97]. En esta última frase se nos muestra que Epicuro consideraba necesario introducir el peso como causa del movimiento de los átomos o, más exactamente, como explicación de su caída, ya que en la cosmología de Epicuro «arriba» y «abajo» aparecen como direcciones absolutas —una innovación que sin duda puede retrotraerse al influjo de Aristóteles. Demócrito, por el contrario, negaba que el movimiento se debiera al peso, algo que el siguiente pasaje pone en claro: «Demócrito dice que los átomos no tienen peso, sino que se mueven por el impacto mutuo en el espacio infinito» [98]. Las palabras «no tienen peso» han de interpretarse como que el peso no es la causa del movimiento —tal como se establece en la siguiente aserción de Cicerón: «La fuerza motriz que obtendrán de Demócrito es diferente, una fuerza directriz que él denominaba un «soplo»; de ti, Epicuro, obtendrán la fuerza de gravedad o peso» [99]. La imagen dibujada por Demócrito nos recuerda a los átomos de un gas ideal en la moderna teoría cinética de gases, mantenidos en un movimiento perpetuo caracterizado por las colisiones constantes.

A lo largo de la literatura de la escuela atomista se hace gran hincapié en el movimiento perpetuo de los átomos, pero ¿cuál es el origen de ese movimiento? Aristóteles critica con severidad la ausencia de una causa para los movimientos atómicos en las doctrinas de Leucipo y Demócrito. En su libro *Del Cielo* escribe: «Por tanto, cuando Leucipo y Demócrito hablan de que los cuerpos primarios se mueven perpetuamente en el vacío infinito deberían decir de qué movimiento se trata y cuál es el movimiento natural con que lo hacen, pues aunque cada uno de los átomos podría ser movido a la fuerza por otro, cada uno de ellos debería también contar con algún movimiento natural del que fuera desviado por aquel movimiento violento» [162]. Y la misma cuestión se plantea de nuevo en la *Metafísica*: «Pues ellos afirman que siempre hay movimiento. Pero por qué lo hay y qué clase de movimiento,

no lo dicen, ni la causa de que sea de tal modo o tal otro. Nada, en efecto, se mueve al azar, sino que siempre debe haber un motivo; por ejemplo, una cosa puede moverse ahora por naturaleza de un cierto modo y hacerlo de otro por fuerza o bajo el influjo del entendimiento o cualquier otra cosa» [170].

Fue un profundo instinto científico el que libró a los fundadores de la escuela atomista de ese laberinto del pensamiento en que Aristóteles se vio atrapado. No empezaron planteando el problema de la causa del movimiento, sino que lo aceptaron como un hecho dado al igual que hicieron con los átomos. Algunas veces no es inteligente plantear a la vez todas las cuestiones involucradas en un problema científico, sino que, al contrario, se requiere una desarrollada intuición científica para limitar el tipo de cuestiones que lo son de partida y considerar algunos de los fenómenos como derivados mientras al resto se los considera como datos últimos.

Incluso sin conocer la ley de conservación del momento (cantidad de movimiento), Leucipo y Demócrito dieron en el clavo al asignar a cada átomo un movimiento preestablecido y describir la suma total de los movimientos atómicos mediante el modelo mecánico elemental de la colisión elástica. De este modo lograron captar los primeros principios de la ley cinética de la materia, sin ayuda alguna de las matemáticas y tan sólo con los más rudimentarios conceptos estadísticos: «Esos átomos que están separados unos de otros por el vacío infinito y difieren entre sí en forma, tamaño, posición y orden, se mueven en el vacío y al encontrarse unos con otros colisionan. Algunos de ellos rebotan al azar en distintas direcciones mientras que otros, entrelazándose en consonancia con la simetría de sus formas, tamaños, posiciones y ordenaciones, permanecen unidos y así es como dan lugar a los cuerpos compuestos» [75].

Este pasaje enormemente claro no deja resquicio de duda de que, en opinión de los atomistas, no todos los átomos forman parte de los compuestos, sino que hay siempre algunos que siguen moviéndose libremente. Lucrecio describe con gran detalle este fenómeno en el segundo libro de su poema, señalando que los átomos a veces escapan de los cuerpos compuestos recuperando su libre movilidad en el vacío. En el caso de los átomos entrelazados para formar los compuestos, los atomistas sostuvieron consistentemente que conservan su movimiento perpetuo; cada uno continúa moviéndose en el estrecho espacio limitado por sus vecinos y está sujeto a colisiones

muy frecuentes que son semejantes a vibraciones rápidas dentro de sus cercados. Esto significa que el entrelazado atómico no los transforma en una unidad física puesto que tras combinarse entre sí cada cual conserva su carácter individual, como sus movimientos —que bajo esas circunstancias adoptan la forma de vibraciones— lo muestran.

En relación a ello los dos pasajes siguientes, de Aristóteles y su comentarista Simplicio, son de lo más instructivo: «De acuerdo con su opinión las magnitudes primarias son infinitas en número y no divisibles en extensión, que lo múltiple no nace de lo uno, ni lo uno de lo múltiple, sino que todas las cosas se generan por la unión y la combinación de las magnitudes primarias. En cierto modo esos pensadores están diciendo que todo cuanto existe son números o derivados de números» [76]. Esta última afirmación de Aristóteles, que pretendía ser una refutación, lo que realmente pone de relieve, desde nuestro moderno punto de vista, es la gran ventaja de la hipótesis atomista: que proporciona valores cuantitativos de los fenómenos. También Simplicio subraya la identidad básica de cada átomo: «Como resultado de su movimiento, se golpean entre sí y quedan atrapados en una red que los pone en contacto y les hace estar muy cerca unos de otros. Pero con ello no se forma ninguna unidad real. Eso no sería sino una idea estúpida ya que dos o más cosas nunca pueden llegar a ser una... En su opinión, se abrazan y permanecen unidos hasta que una fuerza externa superior actúe sobre ellos agitándolos y dispersándolos» [95].

En su detallada discusión de las partículas compuestas por varios átomos, Epicuro encuentra difícil explicar la transición del movimiento atómico al de los cuerpos más grandes. Según su teoría, todos los átomos tienen una misma y enorme velocidad. ¿Cómo puede entonces la velocidad más lenta de un cuerpo compuesto que se mueve en una cierta dirección ser el resultado de una combinación de átomos que se mueven con una velocidad enorme en toda dirección? Desgraciadamente las partes de la carta de Epicuro a Herodoto relativas a esta cuestión están alteradas, sin embargo, parece que su oscuridad no puede ser tan sólo atribuida a la alteración del texto. Sin adentrarnos en detalles, es interesante considerar este caso como un ejemplo paradigmático de uno de los fenómenos característicos de la literatura científica de la Antigua Grecia: a veces, pensadores cuya aguda imaginación científica y cuya profunda compren-

sión de hechos complejos resulta realmente sorprendente, se muestran, al mismo tiempo, confundidos ante cuestiones que ahora parecen relativamente simples a cualquiera que tenga idea de las leyes más elementales de la cinética y la mecánica. Un aspecto de esta paradoja merece ser examinado con mayor atención. Si bien es cierto que los conceptos mecánicos básicos fueron desarrollados en sentido estricto durante el siglo diecisiete, no puede, no obstante, negarse que en el Mundo Antiguo se hicieron ensayos serios —aunque fracasados— por clarificar la interrelación existente entre velocidad, fuerza y masa. Hemos visto antes cómo el mismo Aristóteles dedicó un considerable esfuerzo a la formulación de las leyes de la dinámica. Pero, pese a todo, los antiguos no poseían nociones estadísticas con que determinar las leyes para fenómenos en que se ven involucrados gran número de individuos o gran número de repeticiones de una ocurrencia dada. No encontramos entre ellos nada parecido a la «ley de grandes números», la ley de medias, o algo similar, a pesar, incluso, de que los juegos de azar, que tan comunes eran en el Mundo Antiguo, proporcionaban incontables oportunidades para su estudio. De este tema trataremos más extensamente en el próximo capítulo.

La única excepción a esta regla la encontramos —como cabría esperar— en la teoría atomista que se ocupa de una enorme cantidad de entidades individuales y sobre este aspecto contamos con dos famosas descripciones de porciones de la doctrina epicureísta, ambas contenidas en el segundo libro del *De Rerum Natura (De la naturaleza de las cosas).* En la primera, Lucrecio discute el caso de varias partículas que se mueven en direcciones dentro de unos límites dados. Siendo así, el conjunto de tales partículas estará en reposo como si se tratara de una única entidad situada en un espacio dado, o, en otras palabras, el total de las velocidades (si las sumamos como vectores, es decir, tomando en consideración sus direcciones), será cero. Como sabe todo estudiante de física elemental este es el modo en que representamos los átomos de un gas encerrado en un volumen dado. Lucrecio, que, por supuesto, no conocía esta ley, atribuye el reposo aparente a la incapacidad de nuestros sentidos para percibir los átomos móviles. No nos interesa aquí si su razonamiento era correcto o erróneo; lo esencial es que intuyó el hecho de que todo grupo formado por partículas que se mueven al azar se comporta como un único cuerpo en reposo. Estas son sus palabras: «En relación a esto hay un hecho que no ha de sorprendernos, pues aunque

todos los átomos estén en movimiento, la suma, sin embargo, aparenta estar en una quietud absoluta... Ello se debe a que los átomos yacen muy lejos del alcance de nuestros sentidos, con lo cual si son invisibles ellos mismos, también sus movimientos habrán de eludir la observación; más aún cuando hasta las cosas visibles al encontrarse a una gran distancia nos ocultan con frecuencia sus movimientos. Así muchas veces el rebaño de ovejas vaga lento por un collado triscando el sabroso pasto, acudiendo a donde le atrae la jugosa hierba humedecida por el rocío, mientras los corderos, ya saciados, juegan y se topan blandamente, y, sin embargo, en la lejanía nos parece sólo una sombra, un blanco borrón cándido sobre la verde colina» [249].

La segunda descripción está relacionada con un fenómeno mucho más complejo descubierto con el microscopio en la primera mitad del siglo XIX, pero que no pudo ser explicado completamente ni reducido a términos matemáticos hasta comienzos del siglo XX: se trata del movimiento browniano. Cuando miramos al microscopio las partículas en suspensión en un líquido o en un gas, asemejan gotas de aceite en una emulsión o partículas de polvo y humo suspendidas en el aire, y vemos cómo se mueven de un modo perfectamente desordenado, paseándose al azar sin regla ni propósito. Este ejemplo nos muestra de manera indirecta la actividad de los átomos en el líquido o el gas que no podemos ver ni siquiera al microscopio. Cierto es que en el promedio calculado para largos períodos de tiempo el total de los impactos de los átomos sobre las partículas microscópicas se hace cero, pero las desviaciones estadísticas de la media que tienen lugar en cada instante hacen que la partícula esté recibiendo así impulsos y cambiando constantemente de dirección; es ese impulso azaroso lo que da lugar a las incesantes oscilaciones de las partículas.

Este fenómeno lo hallamos descrito e ilustrado al detalle en un pasaje de Lucrecio, notable por su claridad y el modo en que entresacaba los aspectos clave: «Este proceso, por lo que yo puedo decir, es ilustrado por una imagen que constantemente se nos presenta ante los ojos. Porque si observas lo que ocurre cuando la luz del sol difunde sus rayos por los sombríos rincones de las casas, verás a través del vacío una multitud de partículas diminutas entremezclándose en multitud de formas en el haz del rayo, como combatientes de una lucha eterna libran batalla peleando fila a fila sin darse tregua, en una rápida sucesión de reuniones y dispersiones; a partir de ello puedes hacerte una idea —en la medida en que una cosa pequeña

puede proporcionar un ejemplo e idea imperfecta de las cosas grandes— de cuál sea el agitarse eterno de los átomos en el vacío ilimitable; junto a ello, hay otra razón por la que has de volver tu mente hacia esas partículas que parecen danzar en un rayo de Sol: su danza prefigura los movimientos subyacentes a la materia ocultos a nuestra vista. Allí verás que muchas partículas, bajo el impacto de invisibles soplos, cambian su curso y son repelidas en todas direcciones, ora aquí, ora allá. Y debes entender que todas ellas derivan de los átomos ese errar incesante, pues tiene su origen en los átomos, que son los primeros en moverse por sí mismos; después aquellos pequeños cuerpos compuestos que están menos alejados del ímpetu de los átomos son puestos en movimiento por el impacto de sus invisibles choques, y a su vez provocan los de otros ligeramente mayores. Así el movimiento asciende desde los átomos y gradualmente emerge al nivel de nuestros sentidos, hasta el punto de que los cuerpos en movimiento que vemos en un rayo de Sol son movidos por impulsos que permanecen invisibles» [247].

A esta significativa descripción no necesitamos añadir sino el comentario de que describe y explica perfectamente el movimiento browniano mediante un ejemplo erróneo, pues los movimientos de las partículas de polvo tal y como se perciben a simple vista a la luz del Sol están causados por las corrientes de aire. El fenómeno real postulado por Lucrecio sobre la base de un razonamiento abstracto sólo puede ser visto al microscopio. Esta restricción, no obstante, en modo alguno resta importancia al descubrimiento mismo. Puede decirse que el mayor logro de la escuela atomista de la Antigua Grecia fue la introducción del método de inferencia en el razonamiento científico, tal como demuestra el pasaje de Lucrecio, y es una consecuencia natural el que la teoría atomista abriese los ojos del pensamiento científico a la posibilidad de inferencia de lo visible a lo invisible.

En su libro primero, Lucrecio ya había aportado pruebas de esta limitación de nuestros sentidos que nos priva de los detalles de procesos cuya realidad es indudable, aunque finalmente lleguemos a ser conscientes de ellos: «Y ahora, después de haberte enseñado que las cosas no pueden hacerse de la nada, ni una vez engendradas regresar a la nada, tal vez empieces a desconfiar de mis palabras porque mis átomos no pueden captarse con la mirada. Con toda seguridad es que olvidas que hay entre los seres cuerpos que es preciso ad-

mitir aunque no podamos verlos... Y no sólo eso, advertimos también olores diferentes de cosas que, pese a venir a nuestra nariz, nunca vemos; como tampoco vemos las oleadas cálidas ni podemos captar los fríos con los ojos, ni solemos contemplar las voces; cosas todas, no cabe duda, de naturaleza corpórea, ya que pueden impresionar los sentidos, pues ser tocado o tocar, a no ser un cuerpo, no lo puede hacer ninguna cosa.

Por último, las ropas tendidas en el litoral rocoso se humedecen y colgadas al Sol se secan; pero ni el modo en que el humor del agua se asienta es visible, ni a su vez el modo con que al calor se enjuga. La humedad, por tanto, se desmembra en partes tan pequeñas que no pueden advertirlas los ojos.

Otra cosa: habiendo dado vuelta muchos años solares, el anillo que se llevó en el dedo se desgata por dentro; el agua, gota a gota, horada la piedra; la herrada reja del curvo arado insensiblemente se desgasta en los surcos; bajo los pies de la gente vemos cómo se desgastan los empedrados de los caminos; junto a las puertas de las ciudades, las estatuas de bronce ostenta sus manos derechas mutiladas por los besos frecuentes de los que entran y los que salen; vemos continuamente que estas cosas, al desgastarse, disminuyen conforme pasa el tiempo, pero percibir qué partículas se desvanecen en cada instante particular es una capacidad que nos ha sido negada por nuestro poco generoso sentido de la vista» [245].

Para apreciar en su justo valor este y otros pasajes similares debemos recordar cuán importante es la función desempeñada por este tipo de razonamiento científico en la explicación de un fenómeno o la interpretación de un experimento, incluso en nuestra era de ciencia experimental y formulación matemática. Ese elemento esencial del método alcanzó un desarrollo álgido en la época griega y es en la escuela atomista donde indudablemente ocupó un lugar decisivo, aunque también se pueden aducir ejemplos procedentes de otras escuelas.

Hemos visto que las premisas básicas de que partieron Leucipo y Demócrito eran la existencia del vacío y de átomos diferenciados por su forma, situación y disposiciones. Es, por tanto, natural preguntarse ahora en qué medida esos pensadores intentaron extraer todas las consecuencias posibles de tales premisas, y construir sobre ellas una teoría física o química de la materia que fuera una explicación racional de los fenómenos físicos. La respuesta a la pregunta

radica en los supuestos filosóficos de los atomistas. Su modo de aproximarse a los problemas naturales, incluyendo también los fenómenos biológicos y psicológicos, era rigurosamente mecanicista; presentaban todo como resultado de los movimientos de la materia y de los contactos entre sus distintas partes, comenzando por la creación del universo y acabando por los sentidos y el alma humana. Para ellos, no hay necesidad alguna de introducir cualquier otra fuerza motriz como causa de los procesos físicos, pues tales fuerzas, al ser «irracionales», acabarían por quebrar la imagen mecanicista del universo, llegando a atrincherarse en ella bajo el disfraz de causas «espirituales» al modo de la Mente de Anaxágoras o incluso podrían conducir a la confusión de categorías completamente diferentes de la existencia, convirtiendo a los dioses en causa suprema. Por todo ello, al desterrar la existencia de tales fuerzas, Demócrito y sus seguidores se quedaron con una única causa que explicara todo cambio físico: el impacto o colisión de átomos o agregados atómicos.

La aplicación de ese principio a la epistemología llevó a los fundadores de la escuela atomista a adoptar la misma posición que Locke y los empiristas ingleses del siglo XVIII. El fundamento objetivo de la sensación es única y exclusivamente el contacto, pudiendo éste ser de dos tipos: contacto directo entre la persona percibiente y el objeto percibido (como en el tacto o el gusto), o contacto entre la persona y los átomos emitidos desde el objeto que penetran la nariz, el oído o el ojo. Demócrito, como Locke, distingue entre las «cualidades secundarias» de los cuerpos (color, olor, gusto, sonido), que son el producto subjetivo de nuestros sentidos y pueden ser explicadas a través de los atributos mecánicos de los átomos, de sus «cualidades primarias» (tales como la impenetrabilidad, dureza, etc.) que son la expresión objetiva de los «verdaderos» atributos de la materia. Las opiniones de Demócrito sobre el tema se han conservado verbalizadas por Galeno: «El color existe por convención, el dulzor por convención, la amargura por convención; en realidad nada existe salvo los átomos y el vacío» [100]. A lo que Galeno añade: «Esto es lo que dice Demócrito y también que todas las cualidades de las cosas percibidas por nosotros son el producto de la colisión de los átomos. En realidad no existe lo blanco, negro, amarillo, o rojo, lo amargo o lo dulce, pues lo que él denomina "por convención" significa "de acuerdo al uso" o "desde nuestro punto de vista", y no "como son las cosas realmente", que es lo que él denomina "ver-

daderamente".» Y también: «Otros dirán que las cualidades percibidas son de la naturaleza de las cosas, pero Leucipo, Demócrito y Diógenes decían que son esencialmente sujetos de convención, es decir, que proceden de nuestra mente y de nuestras impresiones» [77].

Dado que los escritos de Demócrito no se conservan, tenemos que confiar en las referencias de otros escritores para conocer su teoría de la materia; con todo, no conducen sino a un débil eco que es especialmente difícil de interpretar justo en los detalles de mayor interés para nosotros. Parece probable que muchos pasajes se hayan oscurecido en el curso de su transmisión, si tenemos en cuenta diversas contradicciones y el estado fragmentario e ininteligible de varios textos. Una parte considerable de la teoría íntegra se ha preservado en los escritos de Teofrasto, especialmente en su libro *De la percepción y de lo percibido*, pero también en él los detalles y la claridad de la exposición son muy irregulares. No hay la menor duda pese a todo de que Demócrito intentó explicar las cualidades primarias y secundarias, es decir, todas las propiedades macroscópicas de las cosas mediante los atributos inherentes a los elementos primarios de la naturaleza, algo en lo que se mantuvo fiel a Epicuro. De nuevo unos cuantos ejemplos revelarán una imagen característica: aunque la teoría es estrictamente especulativa y apenas contiene un sólo detalle capaz de sobrevivir a la crítica de la ciencia moderna, los modos de pensamiento de los atomistas antiguos fueron, no obstante, esencialmente los mismos que los de nuestros teóricos atómicos; ambos aspiran a explicar las cualidades sensoriales de los objetos a partir de los cambios físicos ocurridos en el nivel atómico.

¿Cuál es la explicación dada por los atomistas al peso de un cuerpo macroscópico? Como hemos visto, el peso específico, o sea el peso de una unidad de volumen de un cuerpo, era desconocido para los antiguos antes de la época de Arquímedes (287-212 a.C.). Este no sólo tuvo una clara comprensión de ese concepto, sino que también descubrió cómo determinar la densidad relativa de los cuerpos experimentalmente. Antes de esa época había reinado una completa confusión acerca de dicha cantidad elemental, confusión que había alcanzado su clímax con la teoría de Aristóteles de que la pesantez y la ligereza eran absolutos. Para Demócrito estaba claro que el peso de un cuerpo dependía de la combinación de plenitud y vaciedad contenida en él, es decir, de los átomos y las distancias existentes

entre ellos. Traduciéndolo a términos científicos actuales podríamos decir que entendió que el peso de un cuerpo depende de su estructura reticular y de su peso atómico; sin embargo, las palabras de Teofrasto son ambiguas: «Demócrito distingue pesado de ligero por el tamaño (de los átomos). Pues si un objeto es descompuesto en sus partes constituyentes, el peso de sus elementos estará en concordancia con su tamaño, incluso aunque sean diferentes entre sí en forma. Pero en los cuerpos compuestos aquél que contenga más vacío será ligero mientras que el que contenga menos será pesado» [101].

Demos una interpretación liberal a esas palabras y supongamos que Demócrito era consciente de que el peso es una función tanto de la pesantez del tipo de átomos (o mezcla de varios tipos) de que cada cuerpo está compuesto, como también del número de átomos contenidos en un volumen dado, el problema por tanto podría ser resuelto (en principio), aunque en la práctica ser consciente de su naturaleza no sería de gran ayuda, pues Demócrito no conocía ningún medio para medir esas dos cantidades a pesar de lo cual su enfoque del problema es en sí digno de mención.

Igualmente interesante es su intento de explicar las diferencias en otra de las cualidades primarias, la dureza de los cuerpos: «El explica duro y blando de un modo similar. Duro es lo que es denso y blando lo que es raro... Duro y blando, al igual que pesado y ligero, están diferenciados por la posición y disposición de los vacíos. Así, el hierro es más duro y el plomo más pesado, porque el hierro no está compuesto regularmente sino que contiene grandes vacíos en diversos sitios, mientras en otros es denso; en líneas generales predomina en él, sin embargo, el vacío. Al contrario, el plomo contiene menos vacío y en general está compuesto más regular y uniformemente, y aunque es más pesado que el hierro es al mismo tiempo más blando que él» [101].

No es fácil hacerse una clara representación de la «teoría del estado sólido» de Demócrito, o de su «cristalografía», a partir de ese pasaje. A primera vista parece suponer que un átomo de hierro y un átomo de plomo tiene el mismo peso y que la pesantez de los materiales está por tanto determinada por el número de átomos contenidos en un volumen dado, siendo más numerosos los del plomo que los del hierro. Pero mientras que los átomos del plomo están dispuestos regularmente, los del hierro están irregularmente dispuestos en el espacio, de manera que una cierta cantidad de éstos está

más cerca que la distancia regular que separa a los átomos de plomo. Aunque tomásemos una pequeña porción del volumen total de hierro es esa gran densidad la que determina la mayor dureza de su sustancia. Fue quizá este el modo en que Demócrito hizo que el principio de densidad atómica diera cuenta de dos cualidades tan diferentes como la pesantez y la dureza, no siempre asociadas en la misma sustancia. Pero no es imposible que Demócrito —por alguna razón que nos es desconocida— atribuyese la pequeña fuerza y resistencia de una sustancia a su estructura atómica simétrica (como en el caso de la maleabilidad del plomo), pues en otro pasaje de Teofrasto la fragilidad de ciertos cuerpos es explicada suponiendo que sus átomos estén «uniformemente» dispuestos.

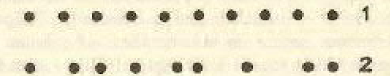


FIG. 7.—*La estructura reticular del plomo (1) y el hierro (2) según Demócrito.*

La descripción del origen de las cualidades secundarias es más detallada, especialmente para el color y los sabores. En ella hay un notorio y significativo cambio de énfasis en Demócrito y Epicuro que resulta de interés si se interpreta como un avance del pensamiento científico. En teoría, Demócrito confiere igual importancia a la forma, situación y disposición de los átomos como causas de los fenómenos sensibles, pero en la práctica cuando explica el color y otras cualidades secundarias considera la forma como la causa principal. Por el contrario, Epicuro devuelve a la situación y disposición su idéntica importancia en este contexto también, dando así el primer paso conducente de una teoría atómica a una molecular.

Oigamos primero a Demócrito, quien distingue cuatro colores básicos, blanco, negro, rojo y verde: «El blanco está formado por átomos lisos, por lo que no es rugoso, ni oscurecedor, ni difícil de penetrar, siendo completamente brillante, ya que es necesario que los cuerpos brillantes tengan poros rectos y sean translúcidos... El negro está hecho de átomos del tipo opuesto, dentados, con lados desiguales y disimilares; de ahí que sus poros sean oscuros, no rectilíneos y no fácilmente penetrables por la luz... El rojo está formado por

los mismos átomos que lo caliente, pero mayores... Una indicación de que los átomos rojos son del mismo tipo de los calientes es el hecho de que obtengamos el rojo cuando producimos calor y que todos los cuerpos combustibles sean rojos en tanto que contienen materia ígnea... Los colores simples están compuestos por todos esos átomos: cuanto menor sea la mezcla de sus átomos con otros, más puro será cada cual. Los demás colores son una mezcla de todos estos» [102].

En relación a esto debería mencionarse la teoría de la visión de los atomistas, procedente a su vez de la teoría de las emanaciones de Empédocles. De acuerdo con ella, las emanaciones son emitidas por los objetos y penetran el ojo, idea que también toma prestada para la explicación de los fenómenos magnéticos. En lo tocante a la teoría de la visión se nos dice que «Leucipo, Demócrito y Epicuro dicen que la visión es esencialmente la entrada de imágenes» [78]. Otra de las fuentes repara en más detalles: «Atribuían la visión a ciertas imágenes, de la misma forma que el objeto, que fluyen constantemente de los objetos de la visión y que percuten sobre el ojo del perceptor produciéndose así la visión. Esta era la opinión anticipada por Leucipo y mantenida por Epicuro, Demócrito y sus seguidores» [79].

Esta teoría de las imágenes subyace a toda la doctrina atomista de la sensación. Según Demócrito, los átomos del gusto penetran en el cuerpo humano a través de la boca, mientras los átomos del olor van de los objetos a la nariz, donde su efecto queda determinado fundamentalmente según su forma: «La acritud está compuesta de átomos angulosos y abruptos que son pequeños y finos, puesto que la acritud se extiende rápidamente por todas partes, y al ser rugosos y angulosos producen contracción. Por tanto el cuerpo se calienta, puesto que contiene espacios vacíos. Porque cuanto mayor es el vacío en un cuerpo, más se calienta. La dulzura está compuesta de átomos redondos que no son pequeños. Por tanto se extiende por el cuerpo y penetra en todas partes suave y lentamente... No hay tipos puros de átomos que estén libres de mezcla. Cada sabor contiene varios tipos, estando compuesto por átomos lisos, rugosos, redondos, angulosos, etc. Cuando mayor es la proporción de uno de los tipos, mayor es su aportación a la sensación y su fuerza» [103].

La percepción varía de forma notoria con el perceptor, especialmente en los casos del gusto y del olor. A fin de dar cuenta de este

hecho en su teoría mecanicista Demócrito añade: «No poco depende del estado del cuerpo en que penetran, por esta razón un mismo tipo de átomos a veces produce la sensación opuesta, mientras el tipo opuesto produce la sensación original.» Si aceptamos el testimonio de Teofrasto podemos deducir que en todos los casos Demócrito supuso que de hecho es la forma de los átomos, y no su combinación, lo decisivo. Pero incluso si esa no fuera realmente su opinión, tal es al menos la impresión que logró transmitir a sus comentaristas. Esto es especialmente palpable en la explicación de fenómenos como los cambios cualitativos que ocurren en una sustancia a lo largo de un período de tiempo; por ejemplo, los cambios en el sabor de los jugos exudados por varias plantas que son, por ejemplo, amargos al principio, para pasar luego a ser dulces, y así sucesivamente. En su libro *De las causas de las plantas* Teofrasto escribe: «No está claro cómo pretendía Demócrito que concibiéramos la creación de diferentes tipos de jugos unos a partir de otros, pues hay tres posibilidades: o los átomos cambian su forma de rugosos y angulosos a redondos; o todas las formas de los átomos están conjuntamente contenidas en lo ácido y lo acre y lo dulce, siendo separados algunos de ellos mientras los demás permanecen; o, finalmente, algunos salen mientras entran otros. Ahora bien, puesto que es imposible que los átomos cambien de forma, por ser el átomo inalterable, quedan dos posibilidades, o unos entran mientras salen otros, o algunos se quedan mientras otros se van» [104].

Las dificultades de este tipo para explicar cambios cualitativos fueron desterradas por la importante transición de la teoría atomista a la molecular, atribuida a Epicuro. En el poema de Lucrecio se encuentran ilustraciones de esta nueva concepción. ¿Cómo es posible explicar cambios repentinos, como los que se dan, por ejemplo, en el color del mar que pasa de ser oscuro en un momento a ser claro en el siguiente, o en el color de los diversos objetos? La respuesta tiene que ser que un color dado resulta de una determinada combinación de átomos y cualquier cambio en esta combinación produce un cambio de color. Así no hay ninguna necesidad de postular una mezcla de distintos tipos de átomos en el objeto, algunos de los cuales son emitidos mientras del exterior se añade un tipo nuevo. Aquí se mencionan aún las formas de los átomos, pero el énfasis principal ha sido desplazado a sus combinaciones: «Supongamos, pues, que los átomos carecen de color por naturaleza y que es la va-

riedad de las formas de que están dotados la que engendra y hace variar los colores; de ahí que sea importante cómo se combinan, en qué posición y qué movimientos tengan entre sí y cuáles padezcan, a fin de que, fácilmente, puedas dar razón al instante de por qué aquellas cosas que eran de color negro un poco antes hayan podido adquirir de repente una pureza marmórea... Podrías decir que lo que vemos con frecuencia negro, después de que se haya mezclado su materia y se haya mudado el orden de los átomos y de que se haya puesto o quitado alguna cosa, se hace de tal manera que parece purificado y blanco» [250]. Lucrecio también subraya el papel desempeñado por la luz en la creación del color. Como prueba de ello menciona la anulación de todo color por la oscuridad y el cambio de color producido por los cambios en el ángulo de incidencia «dependiendo de si los rayos de luz alcanzan al cuerpo directamente o lo hacen en ángulo».

Epicuro mismo, en su carta a Herodoto, habla también de «algo... que puede originar cambios; no cambios a lo inexistente o a partir de lo inexistente, sino cambios producidos por desplazamientos de las partículas y por adición o expulsión de otras» [179]. Y Lucrecio, al resumir las características de las cualidades secundarias, reitera que «así puedes ver la importancia que tienen las diferencias en las combinaciones y posiciones en las que ocurren los mismos elementos y en los movimientos que se transmiten o reciben» [251]. Tanto aquí como en el pasaje anterior [250] esas combinaciones atómicas son descritas como si tuvieran movimientos que estuvieran coordinados de alguna manera, una idea que es característica de toda la concepción epicúrea de la naturaleza de la molécula. Hemos de recordar que Epicuro no admite la existencia de fuerzas que mantengan los átomos de las moléculas unidos convirtiéndolas en una sola entidad, aunque ciertamente casi postula una cohesión mecánica que resulta de las formas dentadas, fácilmente encajables, de los átomos. Sin embargo, según Epicuro, la molécula tiene otra marca distintiva, concretamente la coordinación de los movimientos de los átomos que la componen —los movimientos que éstos «se transmiten y reciben mutuamente» [251].

Ya hemos visto que la perpetuidad del movimiento era una de las premisas básicas de la escuela atomista, aplicándose a los «cuerpos compuestos» [75] en los que los átomos están tan cerca unos de otros que el movimiento dentro de ellos toma la forma de una vi-

bración que resulta de las rápidas y repetidas colisiones y retrocesos.

El cuerpo compuesto más simple de todos es la molécula, denominada por Lucrecio «concilium», que significa unión o asociación, y está próxima a nuestro concepto moderno de compuesto químico. El compuesto es una unidad de orden superior al del átomo y su estructura está estrechamente relacionada con la naturaleza del movimiento de sus componentes. En un pasaje del poema de Lucrecio ese hecho se enuncia en términos que no admiten confusión. Cuando describe el movimiento de los átomos y la creación de cuerpos más complejos mediante sus colisiones, dice: «Junto a ellos hay muchos otros átomos que vagan por el gran espacio vacío, que fueron rechazados de los concilios de las cosas y no han encontrado ningún lugar en el que acoplar sus movimientos después que se unieron» [246]. Coordinación de los movimientos atómicos en la molécula, armonía entre sus diversas vibraciones, gobernadas por principios que regulan sus movimientos recíprocos, tales son los factores físicos que caracterizan la asociación de átomos, el concilium, y lo convierten en una entidad.

De nuevo nos sorprende la capacidad imaginativa y la intuición científica que se halla presente en el énfasis que aquí se pone en una de las características de la molécula, concretamente en la suma total de sus posibles vibraciones y combinaciones, que Epicuro consideró, por supuesto, simplemente como una función de la posición y disposición y no de las fuerzas. Puede que este modelo de la molécula sea en cierta medida resultado de la observación. Los antiguos eran conscientes de que el movimiento mecánico de un cuerpo que está formado por varias partes que se mantienen débilmente unidas por cadenas o sogas depende de la forma de esas conexiones, y que en tales casos hay una especie de «movimiento comunal» de todas las partes en el que el ritmo de cada una queda condicionado por el conjunto. El modo lógico para pasar de este modelo a la representación de la molécula podría haber sido poner fuerzas en el lugar de las sogas, como causa de las vibraciones moleculares. Sólo los atomistas griegos, al oponerse a la asunción de fuerzas, consideraron el movimiento coordinado en el interior de las asociaciones de átomos como el resultado de su disposición mutua y de la naturaleza de sus retrocesos internos, que, a su vez, estaban determinados por las formas de los átomos individuales.

Puesto que Epicuro consideró que las cualidades secundarias se originan básicamente en las moléculas, no es difícil entender su admisión de que cualquier cambio en la molécula, que resultase de un cambio en la disposición de sus átomos, produce un cambio de color, sabor y olor. Está claro por qué debía adscribir, sobre la base de su teoría mecanicista, causas mecánicas a tales cambios moleculares, causas como el movimiento o la agitación que pusieran fin a un tipo de asociación atómica para dar lugar a otra. Al mismo tiempo, Epicuro asumía que las moléculas eran lo suficientemente duras estructuralmente como para seguir existiendo como unidades aisladas cuando escapan de los cuerpos para desplazarse de un lugar a otro.

Epicuro adoptó la teoría de las imágenes que había utilizado Demócrito para explicar el origen de la sensación y la aplicó a las moléculas: «Además, hay réplicas similares en su forma a los cuerpos sólidos pero cuya textura es con mucho más sutil que la de los objetos perceptibles por los sentidos. No es imposible, en efecto, que se produzcan emanaciones de ese tipo en el medio que rodea a un objeto, ni que surja la posibilidad de formación de esos envoltorios huecos y tenues, ni que haya efluvios que conserven en sus sucesiones las posiciones respectivas y el orden que tenían antes en los cuerpos sólidos. A esas réplicas les llamamos ídolos» [177]. Según Epicuro, la velocidad con la que se desplazan esas imágenes es enorme y despiertan sensaciones en nosotros allí donde excitan nuestros cuerpos. No es necesario que discutamos los detalles de la teoría de las sensaciones de Epicuro, con su enfoque mecanicista sumamente primitivo, pero sí es interesante hacer notar la afirmación, enfáticamente repetida, de que la estructura que tiene la molécula dentro del cuerpo —representando a pequeña escala todas sus propiedades— se conserva incluso después de su emisión, permaneciendo intacta en el momento de su impacto sobre nuestros órganos sensoriales y les imparte «la vibración profunda de los átomos que se hallan en los cuerpos sólidos» [178].

Indudablemente fue Epicuro quien desarrolló realmente la teoría molecular e intentó definir las características físicas de las moléculas; pero decirlo no supone negar los logros de Leucipo y Demócrito, que fueron los primeros en concebir la idea molecular al subrayar la influencia de la situación y disposición de los átomos. Podría incluso parecer que fue Demócrito el autor de la analogía que pretendía ejemplificar la naturaleza de la molécula y que es característica de

la concepción sintética de los griegos. La analogía es mencionada por Aristóteles en la *Metafísica*: «Estos dicen que las diferencias son las causas de las demás cosas. Pero enseñan que estas diferencias son tres: la Figura, el Orden y la Posición. Afirman, en efecto, que el Ente difiere sólo por la proporción, el contacto y la colocación de estas diferencias, la proporción es la Figura, el contacto es el Orden, y la colocación es la Posición. Pues la A difiere de la N por la figura; AN de NA por el orden, y I de H por la posición» [80]. En primer lugar, el uso de una analogía lingüística para explicar una teoría física es en sí mismo muy instructivo. El punto en común es, en este caso, la construcción de unidades más complejas a partir de unidades que no pueden ser fragmentadas ulteriormente. Esta idea aparece también reflejada en el término griego «stoicheion», que es utilizado como nombre común por «letra», como uno de los diversos sinónimos griegos de «átomo» y en el sentido aún más general de los elementos últimos de la realidad física. Platón usa la palabra con ese doble significado en el *Teeteto* al explicar la diferencia entre esos elementos que no pueden ser analizados más, y sus combinaciones. Para apoyar su posición recurre a la diferencia análoga existente entre las letras, como elementos primarios del lenguaje, y las sílabas construidas a partir de ellas y que por sí solas carecen de significado. Esa comparación aparece de nuevo en *El Sofista*, esta vez con el vocablo usual de «gramma» por letra: en la realidad hay algunas cosas que se combinan con otras, mientras que en otros casos tal combinación es imposible; las letras del alfabeto, por ejemplo; algunas pueden formar una combinación armoniosa, mientras otras no pueden combinarse para formar una unidad más compleja.

La imagen de Demócrito es la más adecuada de todas. De acuerdo con su idea de que los átomos son literalmente las unidades primarias de la materia, considera el carácter atómico de las letras del alfabeto como símbolo de la estructura del universo físico. Las letras-átomos, que están desprovistas de significado y tan sólo se diferencian por sus formas, se combinan para formar sílabas y palabras que son funciones de la posición y la disposición. Esas combinaciones son «moléculas» lingüísticas, compuestos que son unidades de orden superior con un significado definido y que a su vez se combinan para formar la entidad lingüística de rango más alto —las oraciones, que son los vehículos del contenido significativo. Al igual que la palabra es algo más que la suma algebraica de sus letras inte-

grantes, así también una asociación particular de átomos en una molécula es algo diferente de la mera combinación geométrica de elementos. Una entidad queda formada, y por su constitución específica recibe una cualidad concreta que percibimos como color, sabor, u olor. Cualquier cambio en una de las unidades constituyentes da lugar a otro, cualquier alteración de tan sólo uno de los elementos produce todo un cambio en la cualidad característica del conjunto. En otro pasaje Aristóteles vuelve sobre esta idea y añade: «Con las mismas letras, en efecto, se compone una tragedia y una comedia» [81]. Aristóteles, aunque estaba por completo en desacuerdo con la teoría atomista, estaba evidentemente impresionado por la imagen de las materias primas del alfabeto que adoptan formas muy diferentes en su combinación por medio de ciertos cambios estructurales. No es sorprendente, por tanto, que en el mismo pasaje elogie a Demócrito frente a sus predecesores: «En general nadie prestó atención a ninguna de estas cuestiones, a no ser de manera superficial, con excepción de Demócrito. Este parece preocupado por todos estos problemas y, además, se distingue por el modo en que los trata» [82].

Alrededor de trescientos años más tarde, Lucrecio volvió de nuevo sobre la misma analogía a continuación de las palabras que hemos citado antes: «Ni pienses que pueden radicar como propiedades permanentes de los átomos las cualidades que vemos flotar en la superficie de las cosas, y que, algunas veces, vemos nacer y perecer de súbito. Obviamente supone una gran diferencia en mis versos el contexto y orden en que las letras están dispuestas; si no del todo, al menos así es en su mayor parte. Pero las diferencias de su posición distinguen una palabra de otra. Así ocurre asimismo con los objetos reales: cuando ocurre un cambio en la combinación, movimiento, orden, posición, o formas de la materia que los compone, tendrá que producirse el cambio correspondiente en el objeto compuesto» [251].

Resumiendo, pues, parece que el desarrollo de la teoría atómica de Leucipo y Demócrito a Epicuro y su escuela es más un proceso de progreso en la clarificación de los detalles que un avance en las ideas o principios científicos. Una excepción es el concepto de molécula, la asociación de átomos, pues con él hizo Epicuro una contribución original sorprendente al conocimiento científico. Pero, exceptuando eso, puede decirse que los últimos escritos en este terreno fueron

meras explicaciones y comentarios de lo que ya habían descubierto los creadores de la teoría. El mayor logro de los atomistas fue desarrollar un nuevo tipo de razonamiento científico basado en la evidencia por analogía y en la inferencia de lo visible a lo invisible por medio de paralelismos y modelos que funcionan como ilustraciones.

Ya hemos visto que ese logro no fue meramente azaroso, sino que fue la consecuencia lógica de los principios básicos de una teoría que sostiene la realidad física sobre una base infrasensorial. Sin embargo, Demócrito no confinó al microcosmos esta concepción científica. Recordemos la analogía utilizada por Lucrecio cuando explicaba la aparente continuidad e inmovilidad de la materia con el modelo de un rebaño de ovejas pastando. Demócrito ya había usado una analogía similar para explicar la naturaleza de la Vía Láctea, describiéndola como «la confluencia de rayos de muchas pequeñas estrellas continguas que brillan juntas debido a su densidad» [105]. De acuerdo con otra fuente decía: «que está compuesta de estrellas muy pequeñas y apretadas que a nosotros nos parecen unidas debido a la distancia de los cielos a la Tierra, como si se hubieran vertido en un lugar muchos finos granos de sal» [106].

En relación a esto, sin embargo, puede apreciarse una cierta regresión, o lo que podríamos calificar algo así como de actitud reaccionaria, en la filosofía epicúrea de la ciencia. Epicuro no dejó lugar para una teoría que reintrodujera de alguna manera la actividad divina en el reino de los fenómenos celestes. Mantuvo que si se admitía una causa sobrenatural, acabaría finalmente por destruir la paz espiritual del hombre, esclavizándolo a fuerzas ajenas a su control. De ahí la situación paradójica de que en todo lo concerniente a los fenómenos astronómicos, que son macroscópicos, Epicuro insistía en que la explicación científica debía llevarse a cabo con cautela y suspendiendo el juicio, algo que nunca pensó fuera necesario exigir para el reino invisible del átomo. En este terreno se mostraba completamente confiado en la verdad de su explicación. Pero «no ocurre así con las cosas que se encuentran por encima de nosotros: éstas admiten más de una causa generadora y más de una descripción de su naturaleza que armonice con nuestras sensaciones» [185]. Epicuro debía intuir que llegados a ese punto era mejor para él abandonar el principio científico de una sola explicación consistente que errar uno mismo o inducir a otros al error de creer que los fenómenos celes-

tes están sujetos a leyes, lo que es tanto como creer en la existencia de los dioses.

Este tema será tratado luego con más detenimiento. Por el momento concluiremos mencionando otra diferencia típica de concepción entre Demócrito y Epicuro que, de nuevo, revela que Demócrito era más cauto y crítico. Nos referimos a sus opiniones respectivas sobre la naturaleza del conocimiento. Galeno repite en uno de sus escritos la famosa afirmación de Demócrito, aunque con un añadido peculiar: «Una vez que Demócrito había atacado la sensación diciendo que el color existe por convención, lo dulce por convención, lo amargo por convención, pero los átomos y el vacío existen de verdad, deja hablar a los sentidos y decirle las siguientes palabras a la mente: "Pobre mente, tú que recibes de nosotros tus pruebas, ¿tratas de demolernos? Nuestro derrocamiento será tu propia ruina"» [107]. Demócrito dudaba mucho del valor de los sentidos como instrumento de conocimiento. A pesar de que su concepción del mundo era absolutamente racional, se daba cuenta de que la mente no tiene otra elección que hacer uso del más imperfecto e indigno de confianza de todos los instrumentos, los sentidos. En otro pasaje se nos dice: «Hay dos formas de conocimiento, una genuina y otra oscura. A la oscura pertenece todo lo que viene a continuación: la vista, el oído, el olfato, el gusto y el tacto. La otra es genuina y totalmente distinta de ésta... Cuando la forma oscura no puede hacer más —ni ver con más detalle, ni oír, ni oler, ni gustar, ni tocar— y se requiere una investigación más profunda, es cuando el conocimiento genuino interviene como un instrumento que permite discernir más detalladamente» [89].

En Epicuro encontramos la opinión contraria. El escepticismo filosófico de Demócrito es reemplazado por un realismo ingenuo y una fe inquebrantable en los sentidos. Para la mente de Epicuro, dudar de uno sólo de los sentidos es como quitar el suelo que pisamos: «Si luchas contra todas las sensaciones no tendrás una medida con la que juzgar ni siquiera aquellas que consideras falsas» [187]. No son los sentidos los que representan un peligro para nuestro conocimiento, sino las deducciones que hace nuestra mente a partir de las sensaciones. Lucrecio se ocupa extensamente de este problema: «Encontrarás, de hecho, que el concepto de verdad tiene su origen en los sentidos y que éstos no pueden ser descartados. El testimonio que debemos aceptar como más fidedigno es el que es-

pontáneamente puede superar la falsedad con la verdad. ¿Qué vamos a proclamar más fidedigno que los sentidos? ¿Puede invocarse la razón derivada de los sentidos engañosos para contradecirles, cuando ella misma se deriva totalmente de los sentidos? Si no son verdaderas, entonces la razón es enteramente falsa en su totalidad» [252].

En vista del abismo que separa esta opinión de la cuidadosa y equilibrada posición adoptada por Demócrito, no es sorprendente que, con la distancia de la historia, los comentaristas posteriores ligaran a Demócrito y Platón, llegando uno de ellos a comparar las «ideas» de este último con los átomos del primero: «Las escuelas de Platón y Demócrito dicen que no hay otra realidad que la comprendida por la mente. Demócrito lo dice porque en su opinión los fundamentos de la naturaleza no son perceptibles para los sentidos a la vista de que los átomos de que está compuesto todo son por naturaleza carentes de todo atributo sensorial; mientras Platón lo dice porque en su opinión las cosas perceptibles por los sentidos están en un proceso constante de creación y no son permanentes» [108].

Los escasos fragmentos de los escritos de Demócrito que se conservan confirman su posición crítica que era el resultado lógico de su racionalismo y de su concepción pesimista de la capacidad de conocimiento humana: «Realmente nada sabemos acerca de nada, sino que es la Opinión la que domina en todo individuo» [85]. «Resultará obvio que es imposible saber cómo es realmente cada una de las cosas» [86]. «Nada sabemos con exactitud acerca de la realidad, salvo cómo cambia ésta de acuerdo con las condiciones corpóreas y la constitución de las cosas que fluyen sobre (el cuerpo) y hacen impacto en él» [87]. «Y de esa regla hemos de aprender que el Hombre está segregado de la realidad» [84]. El pesimismo aquí expresado por uno de los fundadores de la teoría atómica alcanza su punto álgido en la siguiente aseveración: «Nada conocemos en realidad, pues la verdad yace en el fondo de un abismo» [88].

Capítulo VI

EL MUNDO DEL CONTINUO

«Penetró en ellos el aliento y revivieron.»

Ez. 37, 10

Comenzando en el siglo III a.C. se desarrollaron a la par en Grecia, y más tarde en Roma, dos teoría físicas opuestas y enfrentadas, cada una de las cuales pasaría a formar parte de una doctrina filosófica omnicomprensiva. Una, la teoría atómica, es simplemente la doctrina de Leucipo y Demócrito que con algunas ampliaciones y modificaciones sería incorporada a la filosofía epicúrea. La otra es la creación original de los estoicos y viene asociada principalmente a los nombres de Zenón de Citium, en Chipre (c. 332-262 a.C.), Crisipo de Soli, en Cilicia (c. 280-207 a.C.) y Posidonio de Apamea, en Siria (c. 135-51). La piedra angular de la física estoica es el concepto de continuo en todas sus facetas —del espacio, de la materia, y continuidad en la propagación y secuencia de los fenómenos físicos. La originalidad de la teoría estoica del continuo debe subrayarse, aunque ya Aristóteles en su polémica contra la teoría atómica de Demócrito niega también la existencia del vacío, sobre bases extraídas fundamentalmente de su propia definición del movimiento, e insiste en la continuidad de la materia en el universo. Esa insistencia aristotélica no es, sin embargo, más que un aspecto secundario de su doctrina física. Para él el continuo es esencialmente pasivo, mientras que los estoicos lo transformaron en una cualidad activa, convirtiéndolo en un principio regulador de todos los fenómenos físicos del cosmos.

La sustancia activa del cosmos que lo liga firmemente en un todo único dinámico es «pneuma», el equivalente griego de «espíritu» o «aliento». Ese término apareció en la física griega ya con Anaxímenes. Al principio no era normalmente más que un sinónimo de aire; más tarde, en la doctrina estoica, comenzó a usarse para designar a una mezcla de fuego y aire que poseía en forma más acentuada la cualidad característica de ambos elementos, a saber, su actividad.

Según la definición de Aristóteles, la cualidad común a los elementos activos es el calor, siendo el fuego caliente y seco y el aire caliente y húmedo. Los estoicos definieron de manera diferente los elementos, atribuyéndoles sólo una cualidad a cada uno, y así hicieron al fuego caliente y al aire frío, a la tierra seca y al agua húmeda. Pero concordaban con Aristóteles en atribuir cualidades activas al fuego y al aire, y lo hicieron por dos razones principales, física la primera, y biológica la segunda. Las propiedades elásticas del aire habían sido reconocidas desde hacía tiempo y su comprensibilidad había sido probada por medio de experimentos con aire comprimido en odres. En el período alejandrino, también se empezó a tomar conciencia de la fuerza expansiva del vapor y de fenómenos similares indicativos de la tensión del vapor. Pero la posición que ocupaba el calor en biología ensombreció esas cualidades físicas. Para los biólogos y estudiosos de la naturaleza era obvio desde por lo menos el período presocrático que los procesos térmicos eran inseparables de la vida orgánica y de los fenómenos orgánicos del crecimiento y el desarrollo biológico. Así, Cicerón y otros nos informan de que «Zenón da esta definición de naturaleza: la naturaleza —dice— es como un fuego de artesano que procede ordenadamente en la generación» [188]. Pero fue básicamente en tiempos de los últimos estoicos cuando se realizó un avance revolucionario: las funciones dinámicas del fuego y el aire fueron extendidas hasta abarcar todos los fenómenos naturales, incluidos los característicos de la física pura. Desde un cierto punto de vista podría denominarse a esto la primera aproximación tentativa a una concepción de los procesos termodinámicos del reino inorgánico, una concepción que empezó a filtrarse en la opinión científica de las generaciones posteriores. Cuando esa idea de la ubicuidad de los procesos termodinámicos enraizó definitivamente, produjo una inversión del orden original, y así los fenómenos térmicos generales comenzaron a ser utilizados como prueba e ilustración

de los procesos térmicos orgánicos. Así puede observarse en una afirmación de Cicerón, tomada quizá de su maestro Posidonio: «Las cosas son de tal manera que todo lo que se nutre y crece contiene en sí mismo una fuente de calor, sin la que su nutrición y crecimiento no podrían ser posibles; pues todo cuanto posee una naturaleza caliente e ígnea se mueve y agita por impulso propio; lo que se alimenta y crece se vale de un pulso regular y uniforme» [189].

La historia del concepto de «pneuma» como algo formado de fuego y aire es realmente instructiva a la hora de entender la concepción «biológica» griega del cosmos. El griego proyectaba sobre las sustancias inorgánicas las funciones de los elementos activos en el ser vivo. La existencia del ser vivo depende de su respiración y de los procesos térmicos que se desarrollan en su interior, comenzando a desintegrarse cuando ambas cosas cesan tras la muerte. Por ello los griegos supusieron que la existencia de la sustancia inorgánica y de sus diversas cualidades y características dependía de un principio dinámico del que estaba impregnada. Era, pues, natural suponer que los elementos activos, o pneuma, constituían el fundamento de la existencia del reino inorgánico, del mismo modo que parecían ser responsables de la coherencia y existencia de la estructura regular de todos y cada uno de los seres vivos. En el hombre ese principio de vida es el alma, identificada fundamentalmente con el aliento, y así, el pneuma omni-penetrante convierte a todo el mundo vivo en una única unidad, al menos en principio, siendo la diferencia entre el alma y la vida orgánica apenas algo más que el resultado de variaciones en la composición del pneuma. «Según los estoicos, el alma es un pneuma, como también sucede en la naturaleza orgánica, salvo que el pneuma es más húmedo y frío en la naturaleza, y más seco y cálido en el alma. Por tanto, es un tipo de materia primordial muy similar al alma y su forma se genera mediante la mezcla de sustancias aéreas e ígneas en proporciones adecuadas» [192]. Dando un último paso del mundo orgánico al mundo físico, los estoicos asumieron que el pneuma llena todo el universo, tanto el espacio entre los cuerpos como los cuerpos mismos; penetra en toda sustancia y le da cohesión al tiempo que se expande en el espacio entre los cuerpos. «La teoría de la mezcla de Crisipo es como sigue: él supone que toda la naturaleza está unida por el pneuma que la permea y por el que el mundo se mantiene consolidado y es coherente e inter-

conexo» [193]. (Más adelante hablaremos en detalle de la naturaleza de esa mezcla según los estoicos.)

Esa capacidad para cohesionar es una de las cualidades básicas del pneuma, uno de los signos de su actividad que apuntan a su descendencia a partir de los elementos activos. «Aquellos que más han extendido la idea de una fuerza de unión —como los estoicos— distinguen esa fuerza de lo que une. La sustancia del pneuma es el agente cohesor, mientras la sustancia material es lo que es ligado por éste. Dicen por tanto que el aire y el fuego unen, mientras la tierra y el agua son unidas» [194]. Esa capacidad de mantener unidas las partes del cuerpo de modo que no se desintegre es explícitamente negada a los elementos pasivos: «Pneuma y fuego se ligan entre sí y ligan todo lo demás, mientras el agua y la tierra necesitan de algo más para unirse» [195].

¿Cómo llegan a poseer esa fuerza cohesiva los elementos activos y el pneuma que los sustituye? La fuerza deriva de las cualidades tensoras que poseen. Al principio tal tensión no significaba más que las manifestaciones de la presión en el aire comprimido, o la fuerza expansiva del vapor en el agua en ebullición; sin embargo, el desarrollo de ese concepto científico —compelido por su propia lógica interna— transformó esa tensión (no específica) en una medida característica de la cohesión interna de las sustancias y de su grado de estabilidad. «Los estoicos dicen que la tierra y el agua no poseen una fuerza cohesiva propia, ni pueden ligar otras sustancias, las cuales mantienen su unidad al participar del poder del pneuma y del fuego. El aire y el fuego, por el contrario, gracias a su tensión interna y a su mezcla con las otras dos, proporcionan a éstas su tensión, permanencia y sustancialidad» [196]. Esa tensión (tonos) o la «tensión del pneuma» (pneumatikos tonos), como es explícitamente denominada en muchos ejemplos, es la cualidad distintiva más significativa del pneuma, debido a la cual se convierte en una entidad no del todo diferente del concepto de campo físico de la ciencia contemporánea. Es en virtud de su carácter dinámico por lo que la tensión da una forma definida a todos los fenómenos físicos. Plutarco cita un instructivo pasaje extraído de los numerosos escritos de Crisipo: «La materia pasiva e inmóvil es el sustrato de las cualidades, mientras estas mismas son pneumata y tensión aérea inherentes a las partes de la materia, determinando la forma de ésta» [197]. Pero la frase que precede a este pasaje es aún más

explícita: «La estructura de la materia es simplemente aire, pues los cuerpos están ligados por aire. Asimismo, todo lo que se mantiene unido en una estructura material deriva esa propiedad del aire cohesionado que en el hierro se denomina dureza, en la piedra espesor y en la plata blancura». Esta segunda función del pneuma —imprimir en las diversas sustancias el sello de sus cualidades específicas— posee un interés especial, ya que constituye el envés en la teoría del continuo, de la forma y disposición de la teoría atomista. Hemos visto que los átomos individuales carecían de todas las cualidades «secundarias» inherentes a los cuerpos que forman al combinarse; esas cualidades eran sencillamente el producto de una disposición espacial, o lo que es lo mismo, venían determinadas por las combinaciones de ciertas formas en un orden espacial concreto. Ahora bien, una teoría consistente del continuo exige otro principio de diferenciación, porque en ella la materia informe e indiferenciada puede ser dividida al infinito y no contiene ninguna unidad última sobre la que pueda erigirse un sistema de estructuras.

Los pasajes que se han citado antes muestran de forma neta que los estoicos reemplazaron el principio de *disposición* por el principio de *síntesis* y utilizaron este último con una doble función: en primer lugar, la mezcla de pneuma con la materia transforma a ésta de algo informe en una sustancia con unos atributos físicos definidos; y lo que es más, cada uno de esos atributos depende en su calidad y grado de la medida en que se entremezclan fuego y aire en el pneuma. Todos los atributos físicos especiales de la sustancia vienen determinados por la proporción de esos dos componentes en el pneuma y esa es la interpretación que ha de hacerse de la información antes citada: «...la forma de la materia primordial es el producto de la mezcla de las sustancias aére e ígnea en las proporciones adecuadas» [192]. En correspondencia con la gradación continua e infinita de las propiedades físicas, los estoicos definieron una gradación continua e infinita en la síntesis del pneuma: renunciando a la simplicidad del pneuma resolvieron el problema de la diferenciación en la teoría continuista de la materia. Los comentaristas posteriores que se opusieron a los estoicos, naturalmente se centraron en este aspecto y sacaron partido del hecho de que el principio de síntesis contradice el concepto de sustancia simple. «Si el pneuma está formado de fuego y aire y permea todas las sustancias mezclándose con todas ellas, y si la existencia de cada una de ellas depende de él,

¿cómo puede entonces un cuerpo ser algo simple?» [198]. Hoy sabemos que cualquier sistema científico autoconsistente sólo puede conseguirse mediante compromisos de este tipo.

Los antiguos comentaristas de los estoicos ya habían señalado la similaridad entre el pneuma y el éter, y con ello querían dar a entender sólo que ambos eran raros y tenues, ya que el lugar del éter —la «quinta sustancia» de Aristóteles— estaba en los cielos y era la sustancia de que estaban hechas las estrellas. Sólo en el último período el éter llegó gradualmente a ocupar las vastas extensiones del cosmos; su principal función era por tanto llenar todo el universo de acuerdo con el antiguo dicho de que la «Naturaleza aborrece el vacío». A comienzos de la moderna era científica la teoría del éter sufrió transformaciones que la hicieron muy similar a la teoría del pneuma de los estoicos. Newton adscribió al éter, en términos que no dan pie a confusión alguna, una función cohesiva entre otras, y durante algunas épocas de su vida imaginó algo parecido a una «teoría unificada de campos» a fin de proporcionar una sola explicación a los fenómenos de la luz y la gravitación. Hacia el final de la tercera parte de sus *Principia Mathematica* (1687) Newton añadió unos cuantos comentarios acerca de «un cierto espíritu muy sutil que impregna y yace escondido en todos los cuerpos groseros, por cuya fuerza y acción las partículas de los cuerpos se atraen unas a otras a cortas distancias, y se adhieren si están contiguas». Pero la cohesión no era la única cualidad que Newton atribuía al éter, como vemos a continuación: «Y los cuerpos eléctricos operan a mayores distancias tanto repeliendo como atrayendo a los corpúsculos circundantes; la luz es emitida, reflejada, refractada, e inflectada y calienta a los cuerpos; toda sensación es excitada y los miembros de los animales se mueven de acuerdo a su voluntad, es decir, mediante vibraciones de su espíritu que se propagan unas a otras a lo largo de los filamentos sólidos nerviosos, desde los órganos externos de los sentidos hasta el cerebro, y de éste hasta los músculos».

Hay una estrecha similitud entre el éter de Newton y el pneuma, una semejanza que se extiende a las funciones que desempeñan en la esfera de los fenómenos físicos. Newton no dice explícitamente que el éter proporcione cualidades físicas a la materia, pero al intentar utilizarlo como explicación de la fuerza de gravedad se ve compelido a seguir a los estoicos, rechazando la simplicidad de la materia primordial. Postuló diferentes grados de densidad y rareza en el éter

según estuviese dentro o fuera de la materia, y esas variaciones aspiraban a explicar la atracción mutua universal de ciertas sustancias (cfr. su *Optica* y su carta a Robert Boyle de 1678).

Los atomistas sostienen que la única forma de movimiento era el movimiento de locomoción de las partículas y que el único modo en que podía desarrollarse la actividad física era mediante el impacto de unas partículas con otras. Los estoicos fueron los primeros —gracias a su amplia concepción del continuo— en proporcionar una cuidadosa imagen de la naturaleza de la propagación de un fenómeno en un entorno continuo. Y hemos de señalar el notable avance que representaron con respecto a los continuistas que les precedieron, especialmente respecto a Aristóteles. En diversos lugares, como su libro *De Anima,* Aristóteles discute el fenómeno del sonido y su propagación, pero en ninguna parte menciona cómo se propaga. Los estoicos fueron los primeros que explícitamente hicieron hincapié en la propagación circular en dos dimensiones y la esférica en tres, siendo también los primeros en usar la analogía clásica de las ondas de agua: «Los estoicos dicen que el aire no está compuesto de partículas, sino que es un continuo sin espacios vacíos. Si es agitado por un impulso, lo hace en ondas circulares que se desplazan en secuencias regulares hasta el infinito, hasta que todo el aire circundante se ve agitado, del mismo modo que un estanque se agita cuando una piedra lo golpea; pero mientras que en este último caso el movimiento es circular, el aire se mueve esféricamente» [199].

También hay una referencia explícita a la audición en relación con la propagación ondulatoria: «Oímos porque el aire que se encuentra entre la voz y el que escucha es golpeado y se expande en ondas esféricas que alcanzan nuestros oídos, al igual que las ondas en un estanque se expanden en círculos cuando se arroja en él una piedra» [200].

Para los estoicos era obvio que esa expansión ondulatoria dentro de un medio continuo estaba relacionada con la cualidad elástica de dicho medio. El astrónomos estoico Cleomedes (*c.* 1 d.C.) dice: «Sin una tensión límite y sin el pneuma que todo lo penetra no seríamos capaces de ver ni de oír, pues las percepciones sensoriales serían impedidas por los espacios vacíos interpuestos» [242].

Toda la teoría estoica de la percepción estaba erigida sobre los conceptos de tensión y las propiedades de un continuo en constante estado de tensión. Desde el punto de vista estoico la visión se debe

a la luz que deja el centro del alma del vidente a través de su ojo y le conecta con el objeto visto al alcanzarlo y tocarlo; los mecanismos de este proceso son descritos del siguiente modo en un fragmento: «Según Crisipo ...la vista se debe a que la luz entre el observador y el objeto observado se expande cónicamente. El cono se forma en el aire con su apex en el ojo del observador y su base en el objeto observado; de este modo la señal es transmitida al observador por medio del aire agitado, justo como con un puntero» [201]. La percepción sensorial del objeto observado viaja desde el observador hasta su alma, y también en esa operación desempeña una función el pneuma, ya que continúa operando como un «medio elástico» situado en el cuerpo humano, incluso en el caso de los procesos mentales. Lo que es realmente digno de ser subrayado es la profunda comprensión que los estoicos tenían de los fenómenos dinámicos en medios elásticos, y la fuerza de su formulación precisa. Aunque el problema se presentase al principio en relación a un fenómeno biológico, inmediatamente se captó su valor general también para la materia inorgánica. Los estoicos partieron de su teoría del movimiento bidireccional de la percepción sensorial que va del centro del alma humana a sus ojos y oídos y a través del contacto con el objeto que se halla en su exterior, de vuelta a aquélla. Esta imagen nos trae a la memoria un fenómeno físico que sin duda era conocido por los estoicos, nos referimos a la expansión de una onda en un espacio *limitado* del tipo de un estanque o un barreño. En tales espacios las ondas se expanden en círculos concéntricos alrededor de la piedra que ha sido arrojada al agua, hasta que al chocar con los laterales, son devueltas atrás; desde ese momento las ondas que retornan interfieren con las que continúan avanzando desde el centro hacia el perímetro. Esa interferencia da lugar a lo que se conoce en terminología científica como una «onda estancada» o «vibración estática», característica de cualquier cuerpo confinado, como las cuerdas musicales o campanas.

Podemos asumir que para los estoicos se convirtió en el símbolo de la coexistencia de movimiento y reposo en un sistema, y acuñaron el término especial de «toniké kinesis» (movimiento de tensión) para esa vibración. En esa toniké kinesis del pneuma descubrieron un concepto que respondía adecuadamente a las exigencias de la teoría del continuo, explicando las diferencias cualitativas de las diversas sustancias orgánicas e inorgánicas: cada «autovibración» impone por

sí misma una cualidad, lo que constituía una antítesis perfecta de las asociaciones de átomos epicúreas en las que la diferencia era el resultado de los grupos de átomos puestos en estado vibratorio por las repetidas colisiones entre sí. «Hay quienes, como los estoicos, dicen que existe una toniké kinesis en las sustancias que mueve simultáneamente hacia dentro y hacia fuera. El movimiento hacia fuera da lugar a las cantidades y cualidades, mientras el movimiento hacia dentro produce la unidad y la sustancia» [202].

Este concepto creó confusión en muchos de los comentaristas posteriores, por ejemplo en Alejandro de Afrodisia: «... ¿Cuál es el significado de ese movimiento que tiene lugar simultáneamente en dos direcciones opuestas —hacia afuera y hacia adentro— y da a todos los objetos su coherencia con lo que llaman pneuma? ¿Cómo se origina esa forma de movimiento?» [198].

Otros escritores como Filón, utilizaron sin embargo esa analogía para dar una explicación única a la diferencia estructural de las sustancias orgánicas e inorgánicas. «El dotaba a algunas sustancias de un estructura física, a otras de la capacidad de crecimiento, a algunas de espíritu, y a otras de un alma inteligente. En las piedras y árboles que están separados de la creación orgánica, formó un nexo físico semejante a una fuerte atadura. Tal es el pneuma que vuelve sobre sí mismo. Comienza en el centro de la sustancia y la empuja hacia afuera, hasta sus confines... y vuelve de nuevo hacia atrás para situarla en el lugar de que partió [203].

Esta definición de la estructura física de una sustancia a partir de las vibraciones del pneuma nos recuerda a una corriente de pensamiento muy similar en la teoría moderna del continuo, y constituye una prueba adicional de un hecho que ya constatábamos en la teoría atomista: que concepciones científicas básicas semejantes, necesariamente forjan para sí mismas los mismos esquemas de pensamiento y medios de expresión, al margen de cuáles sean los recursos técnicos de la época. Después de todo lo dicho, no puede sorprendernos que la toniké kinesis sirva también como imagen para describir la propagación de un *estado* en el sentido más amplio del término. Filón llegaría incluso a intentar usarlo para explicar la expansión de un evento no-físico, y discutiendo el movimiento del logros —en el sentido de causa espiritual, la palabra del Creador, por ejemplo— dice: «No se mueve mediante cambio de lugar, es decir, dejando un sitio y ocupando otro, sino por medio del movimiento de tensión» [204].

Un científico de la talla de Galeno reconoció el enorme valor de la idea de un movimiento tensor, y lo usó en su ensayo sobre los movimientos musculares. En su opinión, la función de los músculos ha de explicarse a través de su movimiento, y en tal caso, es difícil dar cuenta del movimiento muscular de un brazo extendido pero en reposo. «Aunque ni la extremidad de la que forman parte (los músculos) ni estos mismos parezcan moverse, no por ello podemos dejar de reconocer que se mueven. ¿Cuál es la solución a este problema? Posiblemente la encontraremos en la teoría de los movimientos conocidos como 'de tensión'» [205]. En otras palabras, son las vibraciones estáticas de los músculos las que eliminan la dificultad de explicar el movimiento en reposo. Galeno añade una analogía enormemente interesante entre el equilibrio dinámico de una sustancia y una onda estática, estableciendo la distinción entre un objeto que está en reposo porque ninguna fuerza está actuando sobre él, y otro que está en reposo como resultado del equilibrio de dos fuerzas opuestas. Este segundo caso lo considera como un «reposo dudoso» y toma como ejemplo el de un hombre que nada contracorriente en un río: «Cuando su fuerza sea igual a la de la corriente, permanecerá siempre en el mismo sitio, igual que le sucedería a un hombre que no se moviese en absoluto, y ello porque se mueve hacia adelante por su propio movimiento en la misma medida en que es retrasado por el movimiento exterior... A veces el pájaro parece estar suspendido en el mismo sitio del cielo. ¿Diríamos que está en reposo como si hubiera sido colgado allí? ¿O que se mueve hacia arriba en la misma medida en que su peso le empuja hacia abajo? Esta última explicación parece más correcta... Así, es posible que en todos estos casos el objeto se mueva ora hacia arriba ora hacia abajo como si se viese afectado por movimientos opuestos sucesivos, pero debido a la gran velocidad con que se suceden esos cambios y la extrema rapidez de los movimientos, parezca permanecer estacionario en el mismo lugar» [205]. Las últimas frases dejan claro por qué situó Galeno este pasaje como apéndice a la analogía del movimiento de tensión de los músculos. En todo momento es consciente de que el objeto es un territorio de conflicto perpetuo entre fuerzas iguales y contrarias; ese equilibrio dinámico es análogo —para él— a la vibración estática consistente en dos sistemas de ondas que se mueven en direcciones opuestas.

El pneuma y la fuerza de tensión que llenan todo el cosmos son también agentes creadores de la unidad e interconexión de las diversas partes. Toda la estructura del cosmos es armoniosa y ordenada; su orden y armonía dependen de la existencia de ese pneuma, de ahí que la tensión de éste pase a ser una fuerza cósmica. En la doctrina de Posidonio se completaba esa ampliación de las funciones del pneuma hasta una concepción más amplia de la conexión general existente entre las partes del cosmos, en la que el rasgo central era el concepto de simpatía, término utilizado para la interacción de todas las sustancias cósmicas. «En el cosmos no hay vacío, como muestran los fenómenos, ya que si la sustancia de todo cuanto existe no fuese mantenida unida en algún lugar, el cosmos no podría tener una existencia natural ordenada, y no habría una mutua simpatía entre sus diversas partes» [242]. Obviamente hay una gran diferencia entre la negación aristotélica del vacío y la de los estoicos; la concepción del cosmos de estos últimos como una unidad, como un organismo homogéneo, lograba eliminar la existencia del vacío, dando un nuevo y revolucionario significado al concepto de continuo. En lugar de ser representado como una «yuxtaposición» matemática y topológica, el continuo aparece ahora como una «interrelación» —un campo físico de actividades e influencias que van de lugar en lugar y de sustancia en sustancia, transformando todo el conjunto de las entidades en una estructura que actúa y padece en el seno de una armónica interpretación de las partes.

El concepto de simpatía y la idea de «la existencia de unión y tensión entre las cosas celestes y terrestres» [206] quedan sobradamente demostrados con el descubrimiento de Posidonio de la conexión existente entre la Luna y las mareas oceánicas. Posidonio era originario de Rodas, pero fue un gran viajero, y en el curso de sus viajes llegó hasta el Océano Atlántico. En Gadeira (el actual Cádiz), España, llevó a cabo observaciones exactas de la dependencia que de las fases de la Luna muestran las mareas, y también reunió información sobre este tema proporcionada por los nativos. El geógrafo Estrabón, que vivió unas décadas después de Posidonio, describe los hallazgos de éste en la tercera parte de su *Geografía:* «El afirma que el océano tiene un movimiento periódico como las estrellas. Hay un período diario, uno mensual y otro anual, debidos todos ellos a la simpatía con la Luna. Cuando ésta alcanza sobre el horizonte la altura de un signo del zodíaco, el mar comienza a subir e invade

perceptiblemente la tierra seca, hasta que la Luna llega a la mitad del cielo. Conversamente, cuando la Luna desciende, el mar se retira lentamente, hasta que la Luna está a la altura de un signo del zodíaco desde su puesta. En esta condición permanece el mar hasta que la Luna llega al ocaso y en su movimiento continuado recorre la extensión de un signo del zodíaco desde el horizonte terrestre. A partir de este punto el mar vuelve a subir hasta el nadir de la Luna bajo la tierra. Después de esto hay un reflujo más, hasta que la Luna asciende a la altura de un signo del zodíaco hasta el horizonte. Esta condición se mantiene hasta que la Luna alcanza la altura de un signo zodiacal sobre la Tierra, momento en el que la marea vuelve a subir. Esto es lo que él llama el ciclo diario» [244]. La descripción de Posidonio del ciclo mensual muestra además que también había descubierto la influencia del Sol sobre las mareas: «El ciclo mensual significa que la marea alta es mayor en luna nueva y va decreciendo hasta el primer cuarto para luego aumentar hasta que es luna llena. De nuevo decrece hasta el tercer cuarto, tras el cual aumenta de nuevo hasta la luna nueva». Una descripción más detallada, aunque esencialmente similar, es dada por Plinio el Viejo alrededor de ciento cincuenta años después de Posidonio. El contemporáneo de éste, el astrónomo Seleuco de Babilonia, también conocía la conexión de la Luna y las mareas, aunque su explicación es estrictamente mecánica: el movimiento de la Luna curva el aire situado entre ella y la Tierra, y esa curvatura es la que provoca la marea alta. Posidonio explicaba el fenómeno por simpatía, es decir, por la tensión del pneuma que hace posible la interacción a distancia de la Luna y la Tierra, y hay que admitir que esta teoría es tan inadecuada como podría caber en una época en la que la naturaleza y universalidad de la fuerza de gravedad eran todavía desconocidas.

Al principio de este capítulo subrayábamos que el término «pneuma» tenía una larga historia. El significado que adquirió en su última metamorfosis estoica planteó un problema que merece la pena discutir en estas páginas. El pneuma es una mezcla de aire y fuego, o, al menos, algún tipo de derivado del aire; no puede ponerse por tanto en duda su materialidad. Ahora bien, una de las pocas leyes fundamentales que han conservado su validez a lo largo de la dilatada y azarosa historia de los conceptos físicos es aquella según la cual «donde hay un cuerpo no puede estar otro». Así, aunque supusiéramos que el pneuma está compuesto del material más rarificado

—tan enormemente raro como se suponía en el siglo XVII y después que era el éter— todavía seguiría siendo necesario que estuviera sujeto a dicha ley fundamental. ¿Cómo podían entonces representar los continuistas la permeación del pneuma en las sustancias? Tal permeación debía ser obviamente completa, ya que en última instancia era el pneuma el que decidía la naturaleza, cohesión y todas las cualidades físicas de las sustancias. ¿Basta con hablar de un simple mezclarse de esa materia con el pneuma? Y ¿qué quiere decirse con ese mezclarse? Estas cuestiones nos llevarían a un problema que ejercitó en no escasa medida las .nentes de los científicos griegos y les ocasionó más de un dolor de cabeza, el problema de la mezcla. ¿Cómo hemos de clasificar el producto de mezclar dos o más componentes? Aristóteles discute esta cuestión en el capítulo décimo de la primera parte de su obra *De generatione et corruptione rerum*, afrontando una tarea mucho más ardua que la de los atomistas. Estos, con su concepción molecular de la materia, podían considerar la estructura o la mezcla de dos líquidos como una especie de mosaico formado por la combinación de los átomos de los dos componentes, al modo en que mezclan un montón de trigo y uno de cebada. Esa es la imagen utilizada por Aristóteles para mostrar que una «verdadera» mezcla no puede, por definición, conseguirse por esos medios. «Se dice... que la cebada se combina con el trigo, cuando cada grano de aquélla queda yuxtapuesto a un grano de éste. Mas, si todo cuerpo es divisible, y si el cuerpo combinado con el cuerpo es homeómero, cualquier parte del uno debería estar junto a cualquiera del otro. Pero, puesto que no es posible que un cuerpo sea dividido en sus partes mínimas, y como la «composición» no es lo mismo que la combinación, sino distinta, resulta manifiesto que no se debe afirmar que los cuerpos están combinados cuando persisten en pequeñas partículas. Esto último será una «composición» y no una mezcla o combinación, y la parte no tendrá la misma proporción de ingredietnes que el todo. Nosotros, en cambio, afirmamos que, si hay combinación, necesariamente lo combinado debe ser homeómero, y que, así como la parte de agua es también agua, lo mismo debe ocurrir con la parte de la mezcla» [165]. Aristóteles encontró pues un nuevo punto flaco en la teoría atomista, que ésta destruía el concepto de mezcla al convertir una mezcla macroscópica en una combinación de entidades microscópicas. No obstante, la teoría del continuo defendida por Aristóteles no era mucho mejor a la

hora de garantizar la homogeneidad macroscópica requerida para conservar el concepto de mezcla, desde el momento en que se daba por supuesto que cada uno de los componentes mantendría su identidad. Aristóteles intenta hacer frente a esa dificultad distinguiendo la existencia «actual» de la «potencial». «Pero, dado que hay entes que son en potencia y entes que son en acto, es posible que las cosas combinadas *sean* en un sentido y, en otro sentido, *no sean,* resultando el producto de su combinación distinto de ellas en acto, pero pudiendo cada ingrediente ser en potencia lo que era antes de combinarse, y no quedar destruido» [165]. Para hacer más plausible esta conclusión, Aristóteles argumenta que cada componente actúa sobre su opuesto, transformándolo en algo semejante a sí mismo, y que la mezcla es el resultado de la asimilación mutua, es decir, de un compromiso verdaderamente homogéneo entre los dos. Aristóteles intentó construir, por tanto, una cierta clase de teoría del continuo como fundamento para su doctrina de la unificación química, un proceso esencialmente distinto de la mezcla mecánica. Pero ese ejemplo de interacción de los componentes y de mutua asimilación le llevó a errar gravemente. Si la cantidad de uno de los componentes es mucho mayor que la del otro, proseguía Aristóteles, entonces «el producto no es una mezcla, sino un aumento del componente dominante, pues el otro material es transformado en aquél. De ahí que una gota de vino no se mezcle con diez mil ánforas de agua; en lugar de ello, pierde su identidad y se desvanece en un volumen total de agua». Aristóteles no ofrece ningún argumento en apoyo de esta peculiar teoría, ni siquiera ninguna línea divisoria por debajo de la cual un componente se desvanezca en otro y por encima de la cual su mutua asimilación haga que se conserve la mezcla. ¿Puede fijarse esa línea a partir de indicios externos? ¿Pueden medirla nuestros sentidos? ¿Hemos de decir que en la medida en que el vino coloree el agua hay una interacción, y que siempre que no se observe ningún cambio de color, el vino se habrá perdido en el agua? Parece como si Aristóteles hubiese olvidado el aviso de Anaxágoras acerca de la debilidad de los sentidos y su famoso ejemplo de cómo esa fragilidad nos impide afirmar la verdad: nuestra incapacidad para observar el ligero cambio que tiene lugar cuando se añade pintura negra, gota a gota, a la blanca.

Pese a que tal podría ser el caso, lo que queda claro es que hallar una solución al problema de la mezcla compatible con la teoría del

continuo no es un asunto fácil. También los estoicos se enfrentaron a ese problema, y, como ya se ha indicado, se vieron llevados a hacerlo por toda la cuestión del pneuma y su permeación tensional de la materia. Fueron sin embargo más metódicos que Aristóteles en el tratamiento que le dieron. En primer lugar, distinguieron tres tipos de mezclas: el entremezclado mecánico, como en el caso de las semillas, la mezcla, en la que un líquido se une a otro, y, finalmente, la fusión que une materiales mediante la destrucción de sus cualidades, como es el caso de las drogas. «La cualidad de los líquidos componentes —como el vino, la miel, el agua, el vinagre, etc.— es evidente en la mezcla. Más aún, las cualidades de esos componentes se conservan en esas mezclas, como lo muestra el hecho de que frecuentemente puedan ser separados por medios artificiales...» [207]. La identidad de los materiales integrantes se conserva incluso en casos extremos en los que pequeñas fracciones de un cierto tipo se mezclan con grandes cantidades de otro tipo, y esto lo descubrieron los estoicos por experiencia: «Esto puede verse en el caso de la mirra, que al prenderse en una llama se hace enormemente rarificada pero conserva, pese a todo, sus cualidades. Hay muchas sustancias que con la ayuda de otras se expanden mucho más de lo que podrían hacerlo por sí solas. Así, el oro, cuando se mezcla con drogas o medicinas puede rarificarse mucho más de lo que puede hacerlo cuando se bate... De ahí que, según (los estoicos), no deberíamos sorprendernos de que haya sustancias que cooperan unas con otras para formar entre sí una mezcla total. De este modo sus cualidades se conservan en esa completa interpenetración, incluso aunque la cantidad de una fuerza sea tan mínima que no pudiera conservar por sí sola su naturaleza en una situación tan rarificada. Así, por ejemplo, una pequeña medida de vino se mezcla con una gran cantidad de agua al ser ayudada por esta última a difundirse por todo ese volumen» [208]. Esta concepción es diametralmente opuesta a la de Aristóteles, para quien una mezcla no puede convertirse jamás en fusión, aunque uno de sus componentes esté presente en una cantidad desdeñable. Crisipo alude explícitamente al ejemplo de Aristóteles de la gota de vino en las ánforas de agua al decir: «Nada hay que impida a una gota de vino mezclarse con todo el mar... Mediante la mezcla esa gota se difunde por todo el cosmos» [209]. Obsérvese con qué consistencia se desarrolla esa idea: un cambio en la proporción existente entre las cantidades de los componentes, no

puede producir cambio alguno en la naturaleza de la mezcla. La penúltima cita contiene la expresión «mezcla total», utilizada por Crisipo para denotar a los mecanismos de mezcla y fusión como distintos del proceso de combinación. Ciertamente se trata de una infracción al principio de que una sustancia no puede ocupar el lugar de otra, pero sólo gracias a una opinión tan extrema podían explicar los estoicos lo que ocurría en casos en los que, en terminología moderna, hablaríamos de mezcla, difusión, suspensión, aleación o compuesto químico. «La mezcla total provoca la expansión de cantidades mínimas en máximas hasta ocupar los confines de la sustancia. Cualquier lugar ocupado por una es ocupado por ambos a un tiempo» [210]. Mezcla total significa la existencia simultánea de dos sustancias, una dentro de otra, cuyas cualidades pueden o conservarse o desaparecer. La yuxtaposición, por otra parte, «es la combinación de sustancias a través de sus superficies, como ocurre en el caso de los silos, en los que se encuentra trigo, cebada, lentejas, y productos similares, o como sucede con los guijarros y la arena en la orilla del mar» [207]. Fue el concepto de mezcla total lo que permitió a los estoicos desarrollar su concepto de pneuma; el pneuma como permeador de todo el cosmos —incluyendo a todas las sustancias que en éste se encuentran— y como determinante de las cualidades de esas sustancias al entremezclarse con ellas del mismo modo en que se produce la interpenetración cuando «sustancias... removidas hasta formar una mezcla se permean mutuamente de modo tal que no haya ninguna partícula de ellas que no contenga una porción compartida de todas las demás» [208].

Toda la controversia sobre la naturaleza de la mezcla muestra que el problema de la continuidad está estrechamente ligado al de la división infinita. La mezcla de partículas de un tamaño finito, sin que importe cuán pequeñas sean, es un asunto elemental que puede ser tratado como el problema del contacto entre partículas, pero las dificultades surgen cuando consideramos partículas que pueden ser divididas *ad infinitum*, o incluso pueden surgir mucho antes, con el problema de la división infinita de una cantidad continua.

¿Cómo abordaron los filósofos y científicos, cuya imagen del mundo estaba dominada por la concepción continuista, el problema de lo infinitamente pequeño? Las cuestiones que se discuten aquí pertenecen al dominio de las matemáticas, y fueron planteadas de un modo provocativo y chocante por Zenón de Elea, un discípulo

de Parménides, doscientos años antes de Crisipo. Las famosas paradojas de Zenón van directamente al fondo de la cuestión, y aunque Platón se sentía inclinado a despreciarlas como acrobacias lógicas, Aristóteles reconoció su importancia y las trató con atención en la sexta parte de su *Física,* sin resolverlas satisfactoriamente. Aquí examinaremos tres de las cuatro paradojas.

«Cuatro son los argumentos de Zenón sobre el movimiento que crean dificultades a los que tratan de resolver los problemas que plantean. El primero afirma la inexistencia del movimiento sobre la base de que el móvil ha de recorrer la mitad del camino antes de llegar al final... El segundo es el llamado de «Aquiles», y consiste en lo siguiente: el corredor más lento nunca será adelantado por el más rápido, pues es necesario que antes llegue el perseguidor al punto del que partió el peresguido, de modo que es preciso que el más lento vaya siempre algo más adelante... El tercero es... que la flecha en movimiento está en reposo, lo que resulta de la suposición de que el tiempo consta de momentos; si no se admite este supuesto, no se sigue la conclusión» [68]. Como Aristóteles señala, la única diferencia real entre el primer problema y el segundo es que en el primero la meta está fija, mientras que en la carrera avanza continuamente. A nosotros nos bastará con examinar el primero y el tercero, en la medida en que arrojarán luz sobre el modo griego de encarar el problema del continuo.

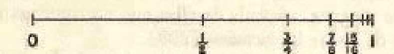


FIG. 8.—*Una de las paradojas de Zenón: la dicotomía infinita.*

La primera paradoja puede representarse en un diagrama mediante una sección de línea recta de la misma longitud que la unidad. A fin de desplazarse del extremo izquierdo —es decir, del cero— al extremo derecho —un punto a distancia uno del anterior— hemos de pasar por un número infinito de puntos determinados por la división sucesiva en dos de, primero, toda la sección, después de su mitad derecha, a continuación de la mitad derecha de ésta, y así sucesivamente. Las distancias de esos puntos al cero son: 1/2, 3/4, 7/8, 15/16, 31/32, 63/64... una serie infinita de números menores que uno. Es decir, es imposible llegar a la meta —el extremo de-

trecho de la línea— en un número finito de pasos. Ahora bien, incluso antes de empezar a tratar la paradoja de Zenón como un problema de movimiento que ha de resolverse únicamente aritmética o geométricamente, nos encontramos con dificultades cuya resolución exige un nuevo tipo de disciplina matemática, el cálculo infinitesimal. Este fue establecido por primera vez en el siglo XVII, aunque su método y sus conceptos fundamentales no fueron expuestos de manera científica completamente satisfactoria hasta la segunda mitad del siglo XIX. Hoy uno de los términos usados con más frecuencia por los estudiantes de matemáticas superiores es el de «limes», esto es, el límite hacia el que convergen los términos de una serie infinita, como la dada arriba. Ninguno de los términos individuales de la serie alcanza la unidad —el extremo derecho de la línea—, pero la diferencia entre la unidad y esos términos es cada vez menor y podemos hacerla tan próxima a cero como queramos, introduciendo simplemente en la serie un número suficientemente grande y finito de términos. Obviamente, siempre quedará un número infinito de puntos entre cualquier línea divisoria y la meta, como el concepto de continuo requiere. Ninguno de esos puntos divisorios es el último, pues continúan infinitamente, apiñándose más y más conforme se aproximan a la meta. Este hecho es el que hace posible la transición al límite que reduce a cero la distancia existente entre los puntos intermedios y el extremo derecho de la línea. El cálculo infinitesimal ha introducido un elemento dinámico en las matemáticas gracias al cual el problema de lo infinitamente pequeño puede ser abordado de manera adecuada.

La importancia de las paradojas de Zenón reside en que muestran la imposibilidad de resolver el dilema mediante fórmulas matemáticas estáticas desarrolladas para tratar problemas relacionados con números finitos. A continuación veremos la influencia de las profundas ideas de Zenón en el pensamiento analítico griego. Veremos cómo, cien años después, Eudoxo de Cnido —y cien años después de éste Arquímedes— usó el principio de convergencia en sus cálculos geométricos. Observaremos también como Crisipo hizo de este principio el pilar básico de su teoría del continuo. Pero antes de nada hemos de volver a las paradojas de Zenón.

Hasta el momento hemos analizado la primera como si fuera un problema estrictamente aritmético, pero, de hecho, se presenta como el problema cinético de un cuerpo en movimiento. Desde este punto

de vista, la situación se planteaba en forma extrema en la tercera paradoja, la de la flecha que está a la vez volando y en reposo; en vuelo, porque se mueve de un lugar a otro del espacio; en reposo, por otra parte, porque en cada instante concreto está en un punto del «ahora». Puesto que hay, de nuevo, al mismo tiempo un número infinito de tales puntos entre dos cualesquiera, todo el movimiento está formado aparentemente por estados de reposo.

Aristóteles, que vio claramente el problema, no pudo hallar una respuesta satisfactoria. Se dio cuenta de que no basta con considerar el tiempo como si estuviera hecho de «ahoras», sino que ha de tenerse en cuenta el «antes» y el «después» (cf. su definición del tiempo [147], citada antes). Además, sabía que una porción de tiempo está constituida por un número infinito de puntos del mismo modo que lo está una distancia definida. Así, el problema de la tercera paradoja es en líneas esenciales, el mismo que el de la primera: ¿cómo puede tener la flecha un movimiento que la desplace por una distancia finita en un período compuesto por infinitos puntos temporales? En su análisis de la primera paradoja (*Física*, cap. VI), Aristóteles llegó muy cerca de la solución, pero sin alcanzarla realmente. «Por esta razón la paradoja de Zenón es incorrecta, dado que supone que nada puede traspasar cosas en número infinito, o tocarlas una a una en un tiempo finito. Pues distancia y tiempo, y todo cuanto es continuo, son denominados «infinitos» en dos sentidos: en lo que concierne a que sean susceptibles de división, o en lo que concierne a la distancia entre los extremos. Nada puede entrar en contacto en un tiempo finito con cosas que están en extensión. Pero tal es posible cuando son infinitas en la división. De hecho, en este sentido el tiempo mismo es infinito» [149]. Aristóteles considera aquí semejantes la distancia y el tiempo, aunque ambos tienen una «longitud finita», ambos pueden ser divididos infinitamente. Fue una intuición acertada por su parte emparejarlos de ese modo, ya que el problema del movimiento no puede resolverse a menos que se conecten tiempo y distancia a través de una cantidad física con la que estamos familiarizados desde la escuela: la velocidad. Velocidad es, por definición, la proporción entre la distancia recorrida por un cuerpo y el tiempo invertido en hacerlo. Como puede verse, para esta definición se requieren *dos* puntos espaciales y *dos* temporales; es decir, los dos extremos de la distancia recorrida y los dos extremos de la porción relevante de tiempo. Ni siquiera este concepto

elemental fue definido con exactitud por Aristóteles y los científicos griegos antiguos; es una creación de la física moderna. Hoy estamos acostumbrados a hablar de la velocidad de un cuerpo en un *punto* dado; decimos así, por ejemplo, que un coche atraviesa una determinada línea de la calle a una velocidad de 40 millas por hora. ¿Cómo podemos aplicar un concepto cinético que requiere dos puntos de espacio y tiempo a un único punto? La respuesta a esa pregunta es la solución a las paradojas del movimiento de Zenón, y fue proporcionada por Newton, dos mil años después de aquél. Si consideramos dos puntos cercanos entre sí en la trayectoria de la flecha, los puntos temporales correspondientes también serán cercanos. Si usamos ahora el concepto «dinámico» de aproximación al límite y tenemos en cuenta distancias siempre decrecientes, esto es, dos puntos cuya distancia tiende a cero, entonces las distancias entre los puntos temporales correspondientes tenderá también a cero; pero la *razón* entre esas dos distancias, esto es, la velocidad en la conjunción de los dos puntos, tenderá a una cantidad finita. De este modo es posible hablar de una velocidad definida en un punto singular que es algo así como uno de los puntos de reposo del cuerpo.

Dejaremos para el último capítulo la cuestión de por qué los griegos nunca lograron una definición elemental de un concepto tan fundamental como el de velocidad, pero por lo que ya se ha dicho podemos saber cuán grandes eran las dificultades que entrañaba la comprensión de la continuidad del tiempo cuando ésta era comparada con la del espacio. El tiempo no sólo es indispensable para la descripción del movimiento, sino también para la de todas las formas de acción física como una variable independiente de la que dependen todas las cantidades físicas. A diferencia de la aproximación al límite mediante cantidades estrictamente espaciales, que fue intuida por algunos matemáticos griegos, y sobre todo por los filósofos estoicos, la convergencia de puntos temporales incorpora una noción clara de dependencia funcional. Pero en este punto incluso los estoicos no lograron sobrepasar las dificultades analíticas. No obstante, algunos textos importantes demuestran que adquirieron una comprensión más profunda de las implicaciones de la paradoja de la flecha que la de Aristóteles. En primer lugar queda mostrado en su definición del tiempo, formulada en términos muy similares a la de Zenón y Crisipo. Este último dice: «El tiempo es el intervalo de movimiento por

referencia, al cual se establece siempre la medida de la rapidez o lentitud» [211].

En este texto queda claramente señalada la conexión entre tiempo y velocidad, mientras que el término «intervalo» podría ser una pista de que estos filósofos ya habían reconocido la necesidad de definir dos puntos temporales. Eran incapaces, no obstante, de conseguir la aproximación «dinámica» a intervalos cada vez menores que convergen en un punto, y por ello deshicieron el nudo gordiano definiendo el «ahora» como sigue: ««Los estoicos negaron la existencia de una porción del tiempo más corta; ya que "ahora" es una cantidad indivisible y lo que se considera como existente en el presente... se distribuye de modo que tenga una parte en el pasado y otra en el futuro» [213]. Plutarco, sin embargo, cita a Crisipo, quien en su obra *De las partes* establecía el axioma de que «parte del presente está en el pasado y parte en el futuro» [212]. Esta formulación, con su definición del presente como centro de una porción de tiempo muy muy pequeña, aunque finita, constituye claramente un intento de comprender los elementos del tiempo como «quantos» y no como puntos inextensos. El presente se convierte así en un «átomo de tiempo», por así decir, o, usando el lenguaje del cálculo, en un diferencial del tiempo. Plutarco, en su crítica a la solución de Crisipo, indica sus repercusiones sobre la descripción de las entidades físicas dependientes del tiempo: «En lo tocante a las acciones y movimientos conduce a un completo emborronamiento de la claridad, pues necesariamente, si el «ahora» se distribuye sobre el pasado y el futuro, lo que se mueve ahora será algo que en parte se ha movido y en parte va a moverse... y, del mismo modo, lo que actúa será algo que en parte ha actuado y en parte va a actuar» [214].

Tan grande era el deseo de los estoicos de proporcionar una respuesta clara a la paradoja de la flecha que estos agudos opositores a la hipótesis atomista y ardientes campeones del continuo y el no compromiso tuvieron que recurrir a una solución «atomista». Las razones dadas por Crisipo son transmitidas por una fuente que ya hemos citado antes: «Dice que es sumamente evidente que no hay tiempo que exista en el presente, ya que la disección de todo lo que es continuo procede de forma infinita y, por ese mismo proceso de división, el tiempo es también infinitamente diseccionable; por tanto no existe tiempo presente en términos precisos, sino que es definido sólo aproximadamente» [211]. Es hoy cuando podemos apreciar al

máximo la agudeza de la solución de Crisipo, ya que hemos sido testigos de los intentos modernos por evitar las «catástrofes de la infinitud» en física mediante recursos similares a los conceptos atomistas de longitud. Sugerencias como la de resolver el problema de la energía infinita propia del electrón introduciendo una «amplitud mínima» son —vistas en la perspectiva propia de la historia de las ideas— afines a la de Crisipo. También es digna de mención nuestra dificultad para tener en cuenta que los obstáculos para una descripción analítica del tiempo sobre la analogía de la amplitud son enormes, por estar tan ligadas a nuestra conciencia subjetiva del tiempo: la sensación biológica fundamental del flujo externo del tiempo permanece presente en el modo en que lo captamos, en abstracto y en su transformación en una dimensión geométrica. Ese paso decisivo que era un prerrequisito para la evolución de la física moderna tuvo que esperar a Galileo.

El enfoque estoico del problema del continuo espacial era completamente diferente, como vamos a ver en seguida cuando volvamos sobre el concepto de «limes», la piedra angular del cálculo superior. Eudoxo en el siglo IV y Arquímedes en el siglo III a.C. utilizaron el principio de convergencia en sus pruebas geométricas. El ejemplo arquimedeano es famosísimo: sustentó su cálculo de π, es decir, de la razón de la circunferencia de un círculo a su diámetro, sobre el hecho de que la circunferencia es mayor que el perímetro de cualquier polígono inscrito y menor que el de cualquier polígono circunscrito. Si consideramos la secuencia de los polígonos regulares inscritos cuyo número de lados aumenta continuamente, hallaremos que sus perímetros forman una serie de longitudes, que aumentan constantemente, pero son siempre menores que el límite que viene fijado por la circunferencia del círculo. Conversamente, sucede con los polígonos regulares circunscritos que conforme aumenta el número de sus lados, disminuyen sus perímetros, permaneciendo sin embargo siempre por encima del límite representado por la circunferencia del círculo. De este modo, la circunferencia del círculo puede ser capturada entre dos series de perímetros que convergen desde lados opuestos. Eudoxo utilizó el mismo método para probar que las áreas de dos círculos se relacionan entre sí como los cuadrados de sus diámetros. También se nos ha dicho a través de Arquímedes que utilizaba el principio de convergencia. Eudoxo probó con éxito que el volumen de un cono (o de una pirámide) es un tercio del volumen de un

cilindro (o de un prisma) de idéntica base y altura. Arquímedes dice que fue Demócrito quien descubrió dicho teorema, aunque fue incapaz de probarlo. Por Plutarco sabemos que, según parece, en el curso de la búsqueda de una prueba exacta, Demócrito se encontró con el problema que formulara como una paradoja: «Ahora véase cómo resolvió Crisipo la tremenda dificultad planteada por Demócrito en uno de los problemas de ciencia natural. Si se corta un cono en secciones paralelas a su base, ¿diremos que las secciones son iguales o desiguales? Si suponemos que son desiguales, entonces harían que

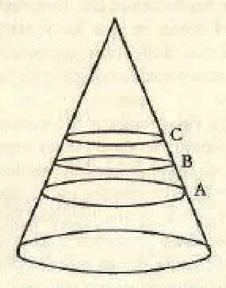


FIG. 9.—*La paradoja de Demócrito de las secciones paralelas adyacentes de un cono.*

la superficie del cono fuese rugosa y dentada en una serie de peldaños. Si las superficies son iguales, entonces las secciones serían iguales, y el cono se convertiría en un cilindro al estar compuesto por círculos iguales y no por desiguales. Tal es la paradoja» [215]. Nos encontramos pues ante otro problema que no puede ser resuelto mediante conceptos estáticos. Demócrito no vio el modo de construir un cono a partir de segmentos circulares, cada uno de los cuales habría de ser ligeramente distinto en área del que estuviera por encima o por debajo. El padre de la teoría atomista, con su fe en las unidades finitas, consideró ese «ligeramente» como una diferencia finita resultante de una serie de pasos. Si, al contrario, la diferencia fuera infinitamente pequeña, sería inexistente, y el resultado sería un cilindro.

El pasaje de Plutarco que acabamos de citar contiene dos soluciones de Crisipo al problema planteado por Demócrito, siendo ambas interesantísimas como intentos de crear una terminología para lo infinitamente pequeño. Dice Crisipo: «A veces una cosa es mayor que otra sin sobresalir» [216]. Lo que al mismo tiempo nos recuerda el concepto de diferencial: cuando un diferencia se añade a una cantidad, esa cantidad aumenta, pero el incremento es infinitamente pequeño, «no sobresale». En otras palabras, la tendencia a cero de la distancia entre las dos secuencias conlleva una tendencia a cero en la diferencia de sus áreas, de lo que resulta que tendremos un cono perfectamente regular.

La expresión «mayor sin sobresalir» representa adecuadamente el término matemático moderno «mayor o igual». En relación a esto, la segunda fórmula de Crisipo resulta de gran interés. Sin duda, sus oponentes le plantearon el siguiente problema: si tomamos tres secciones contiguas del cono y las nombramos de base a altura A, B y C, entonces el segmento limitado por las secciones A y B será un cuerpo mayor que el limitado por las secciones B y C; ahora bien, si las secciones A y C se colocan cerca de la sección B, A no parecerá mayor que B, y B no parecerá mayor que C; así, al aproximarse al límite, A no será aparentemente mayor que C, y de nuevo nos encontraremos con cuerpos iguales, es decir, con un cilindro en lugar de un cono.

La respuesta de Crisipo tal y como la recoge Plutarco es como sigue: «Las áreas serán a un tiempo tanto iguales como desiguales, pero los cuerpos no serán iguales, ya que sus áreas son iguales y desiguales» [215]. La expresión «áreas a un tiempo iguales y desiguales» apunta a las series infinitas de secciones A en su aproximación a B (o de secciones C en su aproximación a B desde arriba). Cuando los cuerpos están limitados por áreas del tipo de las que son mayores o iguales a un área determinada en la convergencia desde ambas direcciones, los cuerpos difieren en volumen. Plutarco no logra entender la noción dinámica implícita en la rara expresión «igual y desigual», de ahí que encuentre en ella una infracción de los conceptos lógicos fundamentales, e intente presentar todo ese enfoque del problema como fantástico. En realidad los estoicos estaban dando vueltas alrededor de la definición de cantidades infinitesimales y, por tanto, abriendo el camino teórico para un desarrollo del cálculo superior en la antigüedad. Que tal desarrollo no se produjera se debió única-

mente a la incapacidad de los griegos para traducir en este terreno el lenguaje común a símbolos matemáticos.

Hay un punto de contacto entre el método de prueba de Eudoxo para el teorema según el cual el volumen de un cono es un tercio del de un cilindro y toda la polémica entre Crisipo y Demócrito. Eudoxo dividía el cono en muchos segmentos mediante secciones paralelas, inscribiendo a continuación cada sección entre series de cilindros circunscritos e inscritos. Estos cilindros formaban una serie de escalones envueltos por el cono regular. La demostración requerida pro-

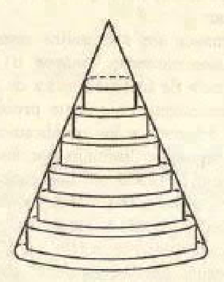


FIG. 10.—*Aproximación de Eudoxo del volumen de un cono por medio de la suma de los volúmenes de los cilindros inscritos.*

cede mediante la suma de los volúmenes contenidos por las series de peldaños y por la convergencia. Es obvio que tales pruebas y el uso del principio de convergencia por matemáticos como Eudoxo y Arquímedes sólo fueron conocidos por un grupo selecto de «expertos». Por esta razón es especialmente significativo que una escuela filosófica de la talla de la estoica hubiese incluido este principio en sus doctrinas, y, formulándolo en términos generales, hubiera dado a estos conceptos una difusión mucho más amplia. El método de inscribir una cantidad entre dos series convergentes fue, por ejemplo, formulado en términos más generales por los estoicos y aplicado a un «cuerpo» cualquiera. Si recordamos que la palabra «cuerpo» en terminología estoica tiene una aplicación muy amplia —abarcando cantidades geométricas, tiempo y espacio, sustancias y hasta propiedades—, podemos considerar la definición siguiente como una expresión

muy general del carácter dinámico del continuo: «No hay un cuerpo límite en la naturaleza, ni primero ni último, en el que el tamaño de un cuerpo alcance su punto final, sino que cada cuerpo contiene en sí algo y el sustrato está sin fin e infinitamente inserto en él» [217].

Es muy posible que esta definición también tuviera la intención de refutar los argumentos empleados en la fútil controversia sobre la posición ocupada en el espacio por un cuerpo. ¿La superficie del cuerpo forma parte de ese «lugar»? ¿O delimita meramente el «lugar» sin ser parte de él? La definición estoica exhibía la futilidad de cortar un pelo en cuatro al proporcionar la terminología necesaria para representar en un cosmos continuo cualquier cantidad como límite sobre el que convergen cantidades contiguas.

Hacia el siglo III a.C. la comprensión griega de la infinitud se había transformado en algo mucho más profundo que la mera invención de un artificio para resolver problemas matemáticos o que la enunciación de un aforismo filosófico. El hecho de que simultáneamente a una profundización en la compresión de lo infinitamente pequeño, se produjeran avances en el terreno de lo infinitamente grande lo prueba. Con respecto a lo infinitamente pequeño, el concepto central a partir del cual se irradian todas las demás nociones y funciones es el de convergencia. En el caso de lo infinitamente grande esa posición central pasa a ser ocupada por el concepto de conjunto. La diferencia característica entre un número finito y uno infinitamente grande halla expresión en la diferencia entre un conjunto finito y uno infinito. «Conjunto» es un término colectivo para unidades de un cierto tipo; si ese conjunto es finito, cualquiera de sus partes será siempre menor que el todo. En este caso el resultado es un exceso de unidades en el conjunto como un todo que no tiene correlato en el conjunto parcial. Pero si el conjunto es infinito, la situación que resulta es distinta, como lo probara por primera vez detalladamente Galileo en su *Discursos y demostraciones matemáticas*, publicado en 1638; pero no fue hasta el siglo XIX, con la teoría de Cantor, cuando el problema se convirtió en una rama importante de las matemáticas. Dos ejemplos muy simples clarificarán la propiedad característica de un conjunto infinito. Tomemos un conjunto infinito enumerable como el de los números naturales. Un subconjunto de éste (también infinito) es el formado por todos los cuadrados perfectos. Ahora es fácil mostrar que la parte es igual al todo situando un número natural junto a su cuadrado. Cada número natural,

sin excepción alguna, puede ser emparejado con un cuadrado, de donde se sigue que los cardinales del conjunto y su subconjunto son iguales. Para el segundo ejemplo tomemos un conjunto no numerable (es decir, un conjunto no contable, a diferencia del de los números naturales): el conjunto de los puntos incluidos en un segmento de recta, Tomemos parte de este segmento y trasladémoslo sobre una paralela a la sección. Unimos a continuación los extremos izquierdos de las dos secciones, desplazando esa línea para unir sus extremos derechos. Cada línea dibujada a partir de este apex y que corta los dos segmentos empareja un punto del segmento completo con uno del segmento parcial, de ahí que el número de puntos de la parte sea igual al de los puntos del todo.

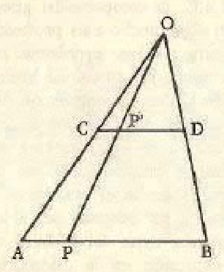


FIG. 11.—*El número de puntos en* AB *es igual al de* CD: *cada punto* P *en* AB *puede ser emparejado con un punto* P' *en* CD.

Estas dos ilustraciones superficiales bastan para presentarnos el significado del éxito que supone que los estoicos fuesen los primeros en definir el conjunto infinito. Su definición es de nuevo citada por Plutarco, quien estaba tan lejos de entender su significado e importancia que les acusó de decir sinsentidos. «¿No es evidente en sí mismo que un hombre está compuesto de más partes que su dedo e, igualmente, que las partes del cosmos sean más numerosas que las del hombre? Esto era algo que todo hombre sabía y entendía hasta que aparecieron los estoicos. Ellos afirmaron la tesis opuesta, que las partes de un hombre no son más numerosas que las de su dedo, ni las del cosmos más que las del hombre. Pues —como ellos dicen— los cuerpos pueden dividirse infinitamente y no hay grande y pe-

queño en las cantidades infinitas, ni una de ellas es mayor que cualquier otra, pues las partes restantes nunca cesan de multiplicarse y de extraer cantidades de sí mismas» [218]. Estas palabras muestran claramente que los estoicos eran conscientes de la diferencia característica existente entre un conjunto finito y uno infinito, y esa consciencia, junto con los pasajes citados a propósito del tema de la convergencia, prueban que lograron en un grado sorprendente controlar realmente los problemas del continuo y los de la infinitud inseparables de aquéllos. La explicación de este éxito ha de buscarse en su concepción dinámica del continuo, así como, por supuesto, de todo el cosmos, pues para ellos el cosmos era la encarnación más majestuosa de todas esas categorías de la continuidad que mantienen la estabilidad de la creación entera en la eterna dinámica de las partes.

Capítulo VII
LA INTERDEPENDENCIA DE LAS COSAS

«Pues la causa estaba en el Señor.»

1 Re 12.15

Hemos visto cómo las dos escuelas rivales de la época helenística sirvieron de portavoces a dos concepciones científicas opuestas. Mientras Epicuro y sus discípulos exponían la teoría atomista, los estoicos, especialmente Crisipo y Posidonio, enseñaban la teoría del continuo. Al involucrar no pocos aspectos científicos, las doctrinas de estos sistemas filosóficos contribuyeron a un proceso de popularización de las ciencias naturales entre amplios sectores de la población. Los escritos de los científicos «puros» e incluso los de los más grandes de ellos, como Arquímedes, Eratóstenes e Hiparco, quedaron presumiblemente restringidos a un pequeño círculo de matemáticos y astrónomos; al fin y al cabo ha de tenerse en cuenta que la investigación científica autónoma de aquellos tiempos siguió siendo fragmentaria y no logró alcanzar nunca la continuidad y tradición adquirida por la ciencia moderna del siglo XVII en adelante. Así pues, los principales canales para la difusión de la ciencia y de los conceptos científicos fueron las escuelas filosóficas que tan profundamente influyeron en la cultura del mundo antiguo.

El resultado de este matrimonio de ciencia y filosofía fue que los conceptos científicos fueron modelados en cierta medida según principios filosóficos y es, por tanto, fácilmente comprensible que la confusión de doctrinas y conceptos y la tendencia a admitir en la ciencia principios y objetivos procedentes de otras esferas del pen-

samiento condujeran frecuentemente a consecuencias dañinas para el desarrollo del método científico y la clarificación de los principios básicos.

Una prueba de lo que se ha dicho la proporciona la actitud de la doctrina epicúrea hacia las categorías de causa y efecto naturales. El tema de los conceptos usados en la Antigua Grecia relacionados con el determinismo y la causalidad ha de tratarse con especial atención. En primer lugar, por un principio general por el que deberíamos evitar cualquier proyección acrítica de nuestros propios conceptos sobre los del pasado, y en segundo lugar, por los cambios ocurridos a lo largo de esa era en el sentido y uso de los términos con los que se expresaba dicha causalidad.

La ley de causalidad ha adquirido un significado preciso en tiempos modernos gracias al desarrollo de la física y la matemática a partir de Newton y, pese a las modificaciones a las que se ha visto sometido por la teoría cuántica, tal significado permanece inalterado. Hay, no obstante, un sentido más general atribuido a la ley de causalidad, un tipo de suposición anterior a cualquiera de sus aplicaciones científicas. En su forma más simple enuncia que en toda la naturaleza existe una conformidad con la ley; nada es arbitrario, todo es por una cierta necesidad, como vemos en la recurrencia regular de todos los fenómenos. Sin esta necesidad no sería posible acumulación alguna de experiencia.

El significado concreto de la ley se desarrolla a partir de su sentido general como el más importante de sus usos, y su éxito en el terreno de la física teórica proporciona la confirmación completa de la ley general.

La concepción de una conformidad general a la ley existente en la naturaleza está presente en la filosofía griega desde el principio. Los intentos de Tales y sus seguidores de definir la materia primordial y descubrir las leyes fundamentales que subyacen a los fenómenos son simplemente una expresión de esa convicción. Se nos ha dicho de varios de los filósofos presocráticos que expresaron explícitamente su creencia en un determinismo. El fragmento conservado de Leucipo, citado en un capítulo anterior, lo afirma claramente: «Nada ocurre por azar, sino que hay una razón y una necesidad para todo» [70]. Esta frase, uniendo razón y necesidad como opuestas a azar, muestra una gran precisión de pensamiento. La concepción del azar está relacionada en nuestras mentes con la carencia de lógica

y de razón, dado su alejamiento de lo que es el curso regular de los fenómenos, o, más precisamente, de aquellos fenómenos que están permanentemente ligados a otros fenómenos. Es esa conexión permanente, esa continua repetición de la misma secuencia de acontecimientos, lo que da a los fenómenos «no-accidentales» su carácter de necesidad y el sello de la causalidad. Dicha causalidad aparece en su forma más perfecta y pura en el ciclo eterno de los movimientos estelares, aunque la observación de Leucipo sea aplicable sin duda a todos los fenómenos naturales, a todo el cosmos, cuya permanencia se muestra a gran escala en esa recurrencia de los mismos eventos, procesos y combinaciones de ambos. A pesar de que los antiguos griegos apenas conocían la experimentación, sólo la observación de la naturaleza era necesaria para llevarles a la conclusión de Leucipo. La opinión de Demócrito —seguidor de Leucipo a este respecto— se conserva en dos fuentes. La primera nos dice: «Demócrito de Abdera partía de que el universo es infinito, ya que nadie lo había creado, y lo consideraba además inmutable, y describía explícitamente sus cualidades. No hay un comienzo para las causas de lo que acontece ahora, y cuanto fue, es y será, ha ocurrido por necesidad desde toda la eternidad» [109]. La ausencia de cambio que para Demócrito era característica del cosmos es simplemente el eje de las cosas continuamente recurrentes, de la secuencia de combinaciones idénticamente repetidas, o con modificaciones en las que también puede encontrarse cierta permanencia. De ahí su conclusión sobre la eternidad de las causas y su necesidad, que dio lugar a la confiada fe en un orden fijo de las cosas futuras.

La segunda fuente sobre la opinión democriteana sobre esta cuestión es Aristóteles quien la menciona a fin de refutarla: «Si adoptamos la asunción general de que hemos encontrado un principio satisfactorio en el hecho de que algo es "siempre" tal y como es, u ocurrirá "siempre" de este modo, nos equivocaremos. Demócrito, por ejemplo, erigió su teoría de las causas naturales sobre el hecho de que las cosas ocurrieron en el pasado justo como ocurren ahora, pero no consideró necesario buscar un principio que explicase ese "siempre"» [110]. Para el físico moderno resulta imposible hallar una justificación para este ataque aristotélico, pues sin duda aprobaría sin reparos la posición de Demócrito, sustentada casi proféticamente sobre una analogía desconocida en su época, la analogía de la máquina. La «necesidad» en los fenómenos, su causalidad, puede

expresarse en términos de un mecanismo —o parte de un mecanismo— cuya esencia es que siempre funciona del mismo modo. Incluso los desarrollos modernos en física, aunque hayan debilitado la analogía mecánica, no han alterado nada sustancial a este respecto; el mecanismo ha sido reemplazado por la ecuación matemática y las reglas matemáticas de operación, pero también éstas son expresión del principio democriteano de que todo funcionará «siempre» de ese modo. En otras palabras, todavía realizan el papel del mecanismo desde el que observamos cómo «ocurrió, ocurre y ocurrirá» algo, de acuerdo con su estructura específica y con la interdependencia de sus partes, así como sobre la base de supuestos sobre el modo en que funcionan dichas partes.

Es cierto que ni Demócrito ni sus sucesores del mundo clásico supieron traducir esa idea a términos matemáticos, ni proporcionar ejemplos concretos mediante nuestro moderno sistema de inducción y experimentación. Sin embargo, no es por esta razón por la que Aristóteles le criticó, sino que lo hizo desde un punto de vista que ahora resulta inadmisible; Aristóteles rechaza todo el sistema de explicación de los fenómenos naturales, tanto físicos como biológicos, construido sobre la analogía de la máquina y el mecanismo automático. La analogía que él utiliza es la del artista creativo, cuyo trabajo de creación va dirigido a un fin determinado: dar forma a la materia informe. Aunque aceptase la máquina como parte de esa analogía, no se habría detenido a describirla, sino que hubiese considerado fundamental la cuestión de quién inventó la máquina y con qué propósito. Demócrito —como el físico moderno— no incluye esa cuestión en su imagen del universo como una máquina para dotarla de causalidad. Aquí, y en su negativa a adentrarse en preguntas «metafísicas», podemos ver su agudeza intelectual y su profunda comprensión de la física. El y su maestro Leucipo pueden considerarse los primeros en dar una formulación científica a la ley causal de la naturaleza.

El hecho de que los fundadores de la teoría atomista —basada como está en el concepto de mecánica pura— fueran también los primeros en formular la idea de causalidad mecánica no requiere ningún análisis clarificador ulterior. Sin embargo, en la doctrina de Epicuro nos encontramos con una bifurcación, y paralelamente al progreso en la teoría atomista ya mencionado en el capítulo V, hemos de hacer notar un serio retroceso en lo concerniente a la noción de causa y

efecto. Dicho retroceso tiene un doble fundamento: Epicuro abandona la idea de un predominio total de la «necesidad» en el cosmos, pero al mismo tiempo muestra una deslumbrante inconsistencia en la aplicación del principio de uniformidad causal a una cierta categoría de fenómenos naturales. Las razones de estas dos graves desviaciones del claro camino del razonamiento científico han de buscarse en el dominio que el pensamiento filosófico ejercía en aquella época sobre las doctrinas científicas, como ya se ha indicado antes. En última instancia, resulta que Epicuro no se tomaba en serio la ciencia y, dondequiera que, en su opinión, sus conclusiones parecían poner en peligro la quietud espiritual del hombre y alterar su felicidad haciendo surgir el miedo o la superstición, prefirió el hombre a la ciencia. La creencia en la libre voluntad del hombre era uno de los principios básicos de la doctrina epicúrea, y puesto que ésta no es compatible con el gobierno absoluto de la necesidad en el universo, con la concepción de un determinismo total a la que en aquellos tiempos se aplicaba comúnmente el término «destino» (fatum, heimarmené), Epicuro creyó necesario dotar a los átomos de libre albedrío. Tan pronto como éste se introdujo en todos los aspectos que resultaban oportunos, la naturaleza mecanicista extrema de la teoría atomista —que asume que el alma también está compuesta por átomos— tenía asegurada de algún modo su concordancia con el libre albedrío humano. Epicuro logró rodear el problema haciendo uso de sus propias asunciones acerca de los movimientos atómicos. Al principio, cuando las moléculas y todas las demás combinaciones de cuerpos diminutos fueron formadas por colisión y conjugación de átomos, estos últimos tenían —según Epicuro— un movimiento único y uniforme. Y esa uniformidad de velocidad fue considerada por él del mismo modo en que la entiende el físico moderno: módulo y dirección constantes. Así, al comienzo había átomos y espacio vacío, con los átomos moviéndose a velocidad constante, en línea recta y con la misma dirección. ¿Qué dirección era esta? Esta pregunta pone de manifiesto la debilidad de la cosmogonía epicúrea, pues sus átomos, que poseen peso, «caen» en una cierta dirección, al igual que cualquier grave que conozcamos lo hace, incluso en una época en la que los términos «arriba» y «abajo» parecen carecer de sentido. Mas incluso en su punto más débil encontramos un sorprendente relámpago de intuición; en contra de Aristóteles, Epicuro afirma categóricamente que en el vacío la velocidad de todos los graves es

la misma, independientemente de su peso: «Más aún, los átomos deben moverse con igual velocidad cuando son transportados a través del vacío y no hay nada que les ofrezca resistencia. Pues si ni lo pesado se mueve más rápidamente que lo pequeño y ligero cuando nada le sale al encuentro, tampoco lo pequeño se moverá más rápidamente que lo grande si —siendo su curso uniforme— nada colisiona con ninguno de ellos» [181]. Esta es, en principio, la conclusión a la que llegó Galileo en su ley de caída de los cuerpos. La cuestión es, tan sólo, que Epicuro planteó un serio problema a su cosmogonía: ¿cómo pueden producirse esas colisiones, sin las que el universo nunca habría sido creado ni ninguno de los cuerpos macroscópicos se habría formado?

En este punto el libre albedrío aparece como un *deux ex machina,* y es así como Lucrecio describe la situación en su poema: «También a este respecto deseamos vivamente que tú sepas que cuando los átomos son transportados en línea vertical hacia abajo a través del vacío, en virtud de su propio peso, en un instante casi imperceptible y en lugares imprecisos del espacio, se desviarán un poco, lo suficiente para que puedas decir que la dirección ha cambiado. Porque si no solieran declinar así, todos, como gotas de lluvia, se desplomarían hacia abajo en el vacío profundo y no habría encuentros ni habría choques entre los principios, con lo que nunca habría creado nada la naturaleza.

Y si por casualidad cree alguien que los cuerpos más pesados podrían, por la mayor rapidez con que caen verticalmente, estrellarse desde arriba contra los más livianos y engendrar así choques capaces de ocasionar movimientos genitales, andaría muy lejos de la verdadera razón. Porque, para los cuerpos que caen a través de las aguas o de los aires raros, es ley acelerar su caída de acuerdo con los pesos, ya que los cuerpos del agua y del aire tenue no pueden oponer igual resistencia a todos los cuerpos, sino que se abren más rápidamente vencidos por los más graves. Pero el vacío, por el contrario, no puede oponer resistencia a ninguna cosa desde ninguna parte y en ningún tiempo, según lo exige su misma naturaleza; por eso todos los cuerpos deben moverse con igual rapidez a través del vacío quieto, aunque sus pesos difieran. No han podido, por consiguiente, jamás, los más graves caer desde arriba sobre los más livianos, ni engendrar por sí mismos choques que modifiquen los movimientos por medio de los cuales gobierna la naturaleza las cosas. Por lo que

insistimos una vez más en que es necesario que los cuerpos se desvíen un poco; nada más que una pequeñez, no sea que parezcan fingir movimientos oblicuos que contradigan la realidad. Porque una cosa es clara y manifiesta: que los pesos en cuanto tales no pueden moverse en sentido oblicuo al precipitarse desde la altura, como tú mismo puedes comprobar. Pero ¿quién es el que puede comprobar por sí mismo que nada se desvía ni un ápice de la línea recta de su curso?» [248]. Aquí Lucrecio desecha la necesidad democriteana y revoca la aplicación general de la ley de causalidad tal y como había sido establecida por los predecesores de Epicuro, y lo hace, en primer lugar, para ser así capaz de trazar la continuación de una cosmogonía que quedaría de este modo desprovista de la secuela de que todo ha de estar gobernado «por razón y necesidad». Pero ese elemento de indeterminismo sirve inmediatamente como prueba del libre albedrío, como parece entreverse en los siguientes versos de Lucrecio: «En fin, si todo movimiento está siempre conectado y, del viejo, nace siempre el nuevo en orden invariable, y los principios al declinar no ocasionan nunca un comienzo de movimiento que rompa las leyes de lo fatal impidiendo que las causas se sucedan desde el infinito, ¿de dónde ha salido para los seres que alientan a través de las tierras esta potestad libre? ¿De dónde, repito, ha venido esa potestad arrancada a los Hados por medio de la cual nos movemos cada cual según su voluntad y torcemos el rumbo, no en un tiempo previsto ni en sitio determinado, sino donde dicta nuestro leal entender?... ¿No ves aún que, aunque una fuerza exterior muy poderosa nos impela y nos obligue con frecuencia a proceder de mala gana y a andar precipitados, hay, sin embargo, en nuestro pecho algo que puede resistirse y oponerse?... De ahí que sea necesario aceptar que en los átomos también hay otra causa de los movimientos, aparte de los choques y pesos, de la que procede esta potestad innata que hay en nosotros, ya que sabemos que de la nada, nada puede ser hecho. Porque la gravidez impide que todas las cosas se hagan por choques, como por una fuerza externa. Pero que la mente misma no tenga una determinación interior en todas sus acciones y no se vea obligada a obrar y padecer como forzada, lo logra esa ligera desviación de los átomos en un sitio indeterminado y en un tiempo imprevisto» [248].

Debe hacerse notar que el problema de la irreconciliabilidad de determinismo y libre albedrío se convirtió en realmente grave sólo

en el período post-aristotélico, y especialmente —como veremos— en la filosofía estoica, mientras que en Demócrito todavía no hay indicios de tal dilema. Esto demuestra cuán profundamente había penetrado la causalidad, como ley omnibarcante, en la conciencia intelectual del hombre, y en poco más de cien años, desde finales del período presocrático hasta la época de Epicuro y de Zenón el estoico.

La cuestión nos recuerda a la larga controversia que sobre el mismo tema empezará con Laplace y continuará a lo largo de todo el siglo XIX, y que fue sostenida tanto por filósofos como por científicos naturales. Controversia que se reabriría de nuevo en este siglo con el desarrollo de la mecánica cuántica y la formulación del principio de «indeterminación». Quizá sea adecuado subrayar, al llegar a este punto, que no existe indicación alguna de que haya alguna analogía entre ese principio y la idea de Epicuro de la «desviación incausada». El problema moderno fue puesto de relieve ante nosotros como resultado de la aplicación del método experimental en física atómica, y por el análisis de la interacción existente entre el observador y el objeto observado. En la física esencialmente no-experimental de la Antigua Grecia nunca se habría dado. Epicuro trató de salvar la dificultad mediante la simple y de algún modo primitiva solución de quitar un eslabón concreto de la cadena infinita de las causas físicas, a fin de conservar el principio de libre albedrío como parte del proceso cosmogónico. La tendencia a oscurecer las dificultades es característica del enfoque casi superficial de Epicuro. Por un lado subraya lo minúsculo de una desviación que es difícilmente perceptible, y de otro, al hacer hincapié sobre la conciencia humana del libre albedrío como una realidad fundamental, tiende a ignorar cualquier evidencia de la dependencia del hombre de factores causales. Toda su armonización está dirigida a preservar, por cualquier medio, la paz del alma humana, evitando cualquier alteración de su equilibrio. En su carta a Menoceo, Epicuro escribe: «Porque, de hecho, mejor sería creer en los mitos sobre los dioses que convertirse en un esclavo del destino de los filósofos naturales; pues lo primero ofrece la esperanza de aplacar a los dioses con la oración, mientras que lo último entraña una necesidad que no conoce la calma» [186].

Ese «mito sobre los dioses», que Epicuro prefiere a la pesadilla del destino, es devastador para la imagen epicúrea de la naturaleza en otro sentido. La física de Platón y Aristóteles introdujo las anti-

tesis de cielo y tierra al interpretar la eterna recurrencia de los movimientos celestes como un signo de su naturaleza divina (Platón), o como el más sublime ejemplo de que la naturaleza lucha por alcanzar la perfección (Aristóteles). La maravillosa conformidad con la ley de todos los ciclos celestes, que podía mostrarse en los modelos geométricos o los cálculos matemáticos, se convirtió en un símbolo de lo divino y en prueba concluyente de la existencia de una inteligencia suprema que conscientemente controlaba el cosmos. Todo ello entraba en conflicto con la línea de pensamiento de Epicuro. En su deseo de liberar al hombre del miedo a los dioses, sin llegar al extremo del ateísmo, asignó a éstos un tipo de existencia simbólica, de perfecta felicidad divorciada por completo de los eventos cósmicos y del destino humano. Esta fue su versión del ideal platónico de la condición que puede alcanzar el hombre si mantiene su alma en paz, y esta es la clave del siguiente extracto de la carta de Epicuro a Herodoto: «Y en lo que concierne a los movimientos de los cuerpos celestes y sus giros y eclipses, salidas y puestas, u otros fenómenos emparentados con ellos, no ha de pensarse que se deben a ningún ser que los controle y ordene o haya ordenado, y que al mismo tiempo disfrute de una perfecta beatitud, además de la inmortalidad... Ni tampoco debemos creer que los que han sido conglomerados por el fuego en una masa posean la gracia y voluntariamente se encarguen de tales movimientos, sino que hemos de preservar todo el majestuoso significado de lo divino en todas las expresiones que aplicamos a dichos conceptos, a fin de que no provoquen opiniones contrarias a la noción misma de divinidad. En caso contrario, esa contradicción producirá la mayor de las alteraciones en el alma humana. Debemos, por tanto, creer que los movimientos se deben a la inclusión originaria de la materia en esas aglomeraciones durante el parto del mundo, y que la ley de la sucesión regular surgió también entonces. Más aún, debemos creer que descubrir la causa adecuada de los hechos más esenciales es tarea de la ciencia de la naturaleza, y que la bendición del conocimiento de los fenómenos celestes está en ella y en la comprensión de qué naturalezas son las que vemos en los fenómenos celestes y en todo cuanto es semejante en exactitud al conocimiento requerido para ello» [182].

Las palabras, y especialmente el acento puesto sobre el que las estrellas sean «masas de fuego» cuyas leyes de movimiento fueron determinadas en la creación, producen la impresión de que Epicuro

desea continuar la tradición de los primeros filósofos naturales y de Anaxágoras o Demócrito, con la idea de incluir los fenómenos del cielo y de la tierra dentro de un único sistema. Pero su miedo a la religión le arrastra, y para desafiar la arrogancia científica de los fenómenos celestes basada en su regularidad y exactitud, adopta una diferencia arbitraria y propia, reduciendo así el valor de toda enseñanza científica. Por un lado, por lo que respecta a lo que es invisible al ojo desnudo, en todo lo concerniente a los átomos, asume cosas y extrae conclusiones con una confianza total en la uniformidad y en la no-ambigüedad de la explicación científica; pero en el caso de los fenómenos celestes, que aunque distantes de nosotros son, sin embargo, visibles al ojo, se niega a asentar leyes fijas y postula el principio de explicaciones alternativas, que destierra cualquier posibilidad de alcanzar una conclusión científica comprehensiva. Unas pocas páginas de su carta a Pitocles proporcionarán la explicación: «En primer lugar hemos de persuadirnos de que el conocimiento de los fenómenos del cielo —ya les consideremos en conexión con otros, ya independientemente— no tiene otro fin que la ataraxia y una firme confianza, al igual que todas las demás investigaciones. No hay que querer forzar lo imposible, ni porqué aplicar para todo tipo de cosas un método semejante al usado en el razonamiento sobre los modos de vida o la solución de otros problemas físicos, como lo atestiguan proposiciones como «el universo consta de cuerpos y lo intangible», o «los elementos son indivisibles», y todos los tipos de afirmaciones que sólo concuerdan a su manera con los fenómenos, no siendo ese el caso de los fenómenos del cielo, que admiten muchas causas que los produzcan y múltiples determinaciones posibles de su esencia que concuerdan con las percepciones. Pues no hemos de estudiar la naturaleza a partir de axiomas vacíos y de principios arbitrarios, sino como lo exigen los fenómenos. Nuestra vida, en efecto, no necesita sinrazones y opiniones hueras, sino desarrollarse sin problemas. Ahora bien, todo sigue su marcha con la mayor serenidad, al menos en lo tocante a cada una de las cosas que podrían ser explicadas de modos diversos a fin de armonizar con aquello que percibimos, cuando uno admite —como no podemos por menos de hacer— teorías probables acerca de ellas; pero cuando admitimos una explicación y rechazamos otra que también concuerda con los fenómenos, está claro que uno se sitúa al margen de toda ciencia natural para caer en el mito. Algunos de los fenómenos que se producen cerca de noso-

tros nos proporcionan indicios sobre lo que sucede arriba, aun cuando no podamos observar los fenómenos del cielo, pues éstos podrían producirse de muchas formas» [183].

Prosiguiendo su carta a Pitocles, Epicuro aplica su principio de explicaciones alternativas a un gran número de fenómenos astronómicos y metereológicos. La expresión «bancarrota científica» no parece demasiado dura para describir ese principio. El propio Epicuro nos ilustra su propósito en un ataque deliberado contra aquellos astrónomos cuyos «artificios» —es decir, cuyos cálculos y su progreso en la descripción de los movimientos estelares— despiertan su enojo, debido a la asociación platónica de la perfecta exactitud con la divinidad: «El tamaño del Sol, de la Luna y de las otras estrellas es para nosotros lo que parece ser y, en realidad, es o ligeramente mayor de lo que vemos o ligeramente menor de ese tamaño, pues también los fuegos en la tierra cuando son vistos a cierta distancia parecen ser así a los sentidos... Las salidas y puestas del Sol, la Luna y los otros cuerpos celestes pueden deberse a encendidos y apagados... O también, el efecto en cuestión podría ser producido por su aparición por encima de la Tierra, y también por la interposición de la Tierra ante ellos: porque de nuevo nada en los fenómenos lo contradice... Puesto que estas y similares explicaciones no discrepan de ningún hecho claramente percibido, si uno siempre se ajusta en estas áreas de investigación a lo posible y puede en todo momento remitirse a lo que concuerda con los fenómenos, sin temer los esclavizantes artificios de los astrónomos.

Los menguantes de la Luna y los crecientes que les siguen podrían deberse a la revolución de su propio cuerpo, o igualmente bien a las conformaciones sucesivas de la atmósfera, o también a la interposición de otros cuerpos; puede darse cuenta de ellos de todas las maneras en que los fenómenos terrestres nos invitan a explicar esas fases; a condición de que uno no llegue a enamorarse del método de la causa única e infundadamente descarte a las demás, sin haber considerado lo que un hombre puede observar y lo que no, y queriendo por tanto observar lo imposible. Otrosí, la Luna puede tener luz por sí misma o procedente del Sol. Porque también en la Tierra vemos muchas cosas brillar por sí mismas, y otras muchas que reflejan la luz. Ni hay fenómenos celestes que contradigan estas explicaciones, si uno recuerda siempre el método de causas múltiples e investiga hipótesis y explicaciones consistentes con ellas, y no con-

templa nociones inconsistentes y las enfatiza sin motivo, cayendo así de diversas maneras en diferentes ocasiones en el método de la causa única... Y no permite que la naturaleza divina sea introducida en algún punto de estas consideraciones, sino que la preserva de gravosos deberes y la deja en completa bienaventuranza» [185].

Las citas precedentes bastarán para mostrar la influencia de los axiomas filosóficos de la escuela epicúrea en detrimento de su actitud científica. De hecho, Epicuro logró con ello lo contrario de lo que deseaba, fortaleciendo la antítesis de cielo y tierra, aunque en sentido contrario, por así decirlo, de la que introdujera Platón. Los medios que utilizó, tanto aquí como en la cuestión del libre albedrío, no eran los adecuados para fortalecer el método científico como una disciplina independiente que lucha por hallar sus métodos propios de investigación y las vías de comprensión que perscriben únicamente sus propias necesidades. Con respecto a la ley de causalidad y a la explicación causal de los fenómenos, la doctrina de Epicuro se convertiría en un desastre al abandonar la tradición democriteana.

Fue justamente en ese aspecto en el que la escuela rival estoica se distinguió por su enfoque, en muchos aspectos próximo al de la ciencia moderna. La confusión de ciencia y filosofía es, por supuesto, común a las dos escuelas, pero mientras que la filosofía de Epicuro, y especialmente su «complejo religioso», actúa como un elemento pernicioso en esa confusión, las bases teológicas del estoicismo ayudaron efectivamente a la clarificación del problema de causa y efecto.

Ya hemos visto cómo la noción de un logos divino que permea todo el universo lleva a los estoicos a concebir a éste como un continuo cuyas partes están en constante interacción. En esta concepción, la causalidad ocupa, como veremos, un lugar destacado. Al contrario que la teología epicúrea que liberaba a los dioses de cualquier «deber gravoso» y los colocaba en el reino de la eterna alegría en el que no tenían responsabilidad alguna sobre lo que ocurriese en el cosmos, la filosofía de los estoicos identificaba la divinidad con la suprema providencia que vigila sobre todo y en todo momento. En cierto modo esto conduce a la concepción teleológica de Aristóteles de que «todo aspira a lo mejor», pero, al mismo tiempo, la analogía entre la continuidad de la providencia y la de todo el complejo de los eventos cósmicos conduce a la identificación de la providencia con la eterna

cadena de la causalidad, con el destino; una teleología no comprometida se aúna con un determinismo no comprometido.

Observamos en ello la paradójica situación de que la escuela estoica esencialmente religiosa se convierte en la legítima heredera de la concepción democriteana de una necesidad mecánica y en el más fiero oponente del intento epicúreo de circunvalar la causalidad.

En los siguientes extractos hay una clara referencia a la desviación incausada de los átomos postulada por Epicuro: «Crisipo refutó a aquellos que imponían a la naturaleza la ausencia de causalidad, mencionando el dado y la balanza y muchas otras cosas que nunca caerían o se desviarían sin una causa externa o interna. Pues no hay tal cosa como la ausencia de causa y el azar. En los impulsos mencionados, que algunos han denominado injustificadamente accidentales, hay causas que, ocultas a nuestra vista, determinan el movimiento en una cierta dirección» [219].

Dos cuestiones merecen aquí especial atención: la apelación al experimento (el dado y la balanza) y la definición del azar como una causa oculta, es decir, como expresión de nuestra incapacidad para aprehender todo el ámbito de la causalidad. Sobre este tema tenemos una sucinta evidencia de la proximidad de los estoicos al punto de vista de Demócrito: «Anaxágoras, Demócrito y los estoicos decían que el azar es una causa oculta a la aprehensión humana» [111].

El segundo pasaje que contraviene la «desviación» de los átomos contiene la argumentación estoica a favor de la ley de causalidad y merece especial atención: «Todo cuanto ocurre es seguido por algo con lo que está conectado causalmente, pues nada existe o ha llegado a ser en el cosmos sin una causa; no hay nada en él que esté completamente divorciado de todo lo que hubo anteriormente. El cosmos se alteraría y desintegraría en pedazos y dejaría de ser una unidad que funciona como un único sistema ordenado si un movimiento incausado fuera introducido en él; tal movimiento sólo será introducido si todo cuanto existe y ocurre tiene una causa previa de la que aquél se siga necesariamente. En su opinión, la ausencia de causa asemeja una *creatio ex nihilo*, igualmente imposible» [220]. El dominio absoluto de la causalidad se convierte así en parte integral del cosmos concebido como un continuo, y esta imagen estoica se completa con la inclusión de la relación causal en aquél, relación que aparece definida con precisión en nuestro pasaje como una serie infinita de causas y efectos unidos por necesidad. Especialmente im-

portante es la última frase citada, en la que la validez de la ley causal es comparada a la de las leyes de conservación (conservación de la materia o de cualquier otra cantidad física).

En Leucipo y Demócrito encontramos una fórmula para cada una de las leyes [70, 92]; pero es en la doctrina estoica en la que por primera vez son situadas una junto a otra, como leyes del mismo tipo, y es en esa doctrina donde la analogía revela una intuición más profunda de la causalidad natural que la física moderna ha confirmado plenamente.

La formulación matemática de las leyes de la física —en sí misma una prueba de la causalidad—, ha mostrado que algunas pueden formularse en forma de leyes de conservación, expresando el hecho de que tal o cual cantidad física se conserva, o de que hay un equilibrio entre ciertas cantidades que señala la permanencia de ciertas condiciones físicas.

No creemos que la posibilidad de formular leyes de conservación sea una coincidencia, sino más bien una confirmación suplementaria de la causalidad, como mostrará un ejemplo muy simple. De acuerdo con nuestras concepciones, la construcción de un *perpetuum mobile* invalidaría no sólo la ley de conservación de la energía, sino también la ley de causalidad, ya que anular las leyes fundamentales de la mecánica que hallan expresión en la ley de la energía equivale a negar la posibilidad de describir los fenómenos elementales de la naturaleza en términos de causas. La frase «la ausencia de causa asemeja una *creatio ex nihilo*» es sumamente oportuna si se refiere a la desviación incausada de la línea recta que sufren los átomos, pues tal desviación implicaría la quiebra de la ley de conservación del momento debido a la creación de una «cantidad de movimiento» de la nada.

El término clave en la ley de causalidad de la física estoica es «destino», el cual ya en la literatura griega más antigua había servido como vehículo de expresión de la necesidad, para convertirse ahora, especialmente en las obras de Crisipo, en sinónimo de causalidad. Fuentes posteriores han conservado algunas de sus definiciones, tres de las cuales se citan a partir de su libro *Del Destino*: «El destino es la razón (logos) del cosmos, o la razón de los eventos que ocurren en el cosmos bajo providencia, o la razón de lo que ha ocurrido, está ocurriendo u ocurrirá» [221]. El término «razón» —que indica algo racional— se halla también en la afirmación de Leucipo,

«por razón y necesidad» ([70], cit., pág. 132). Otra fórmula subraya especialmente la interconexión de las cosas, caracterizada por la permanencia y la ausencia de desviación: «En su cuarto libro de la Providencia, Crisipo dice que el destino es un cierto orden físico en el que algo es siempre causado y resulta de otra cosa, de tal modo que su interacción no puede ser transformada» [222].

Los estoicos usaron el concepto de destino para expresar un absoluto e inflexible determinismo en el sentido que la física clásica le dio, por ejemplo, en la famosa fórmula de Laplace. Entonces, como ahora, los deterministas integrales comprendían en las leyes del destino al hombre y sus obras, y, a este respecto, tanto la escuela estoica como su rival, la epicúrea, se vieron ante el eterno problema destino vs. libre albedrío. Dado que la ética estoica estaba basada en la responsabilidad del hombre ante sus actos y en la creencia en su poder de determinar el curso de su vida, los estoicos no podían desechar el libre albedrío. Mas, ¿podían conservarlo sin contradecir el sentido mismo de destino recurriendo a algún artificio rudimentario como el usado por Epicuro? Por supuesto la solución estoica es también inaceptable, aunque notable por su estructura teórica, y la analogía física que subyace muestra, una vez más, la capacidad analítica de Crisipo y su escuela, así como el poder de su imaginación científica.

Crisipo no extrae un sólo eslabón de la cadena causal, en su lugar divide las causas en dos clases: preliminares y determinantes. Esta división está influenciada por las doctrinas médicas de su época, cuyos ecos aún resonarán en una época posterior. La causa preliminar es el impulso dado a la enfermedad por las condiciones externas, mientras que la causa determinante es la que decide el curso de la enfermedad de acuerdo con las características físicas del paciente. La psicología estoica distingue, sobre la base de esta analogía, entre la causa preliminar de la decisión humana, consistente en el estímulo sensorial externo, y la causa determinante, que consiste en las cualidades innatas de la persona. «Crisipo... distingue entre varios tipos de causa a fin de evitar la necesidad [de negar el libre albedrío] manteniendo el destino. Dice: "Existen causas primarias y secundarias. Si decimos que todo está determinado por el destino según las causas preliminares, no nos referimos a las causas primarias determinantes, sino a las secundarias... Incluso aunque no tengamos control sobre estas últimas, podemos, no obstante, controlar nuestros instintos"»

[223]. La teoría estoica, pues, es que el hombre puede escoger entre dejar que el estímulo actúe sobre su naturaleza o no hacerlo. No es asunto nuestro trazar aquí las complicaciones en que se vieron envueltos los estoicos al intentar en vano explicar las dificultades obvias que plantea la distinción de causas, y especialmente el hecho de que el ejercicio de la elección está también ligada a la cadena de las causas preliminares sujetas a las leyes del destino. Pero lo que sí haremos por el momento es calibrar la analogía física que se cita en relación a esto: «Si arrojas una piedra cilíndrica por una rampa, tú eres la causa de su descenso al proporcionarle el impulso; pero rodará no debido a tu actividad, sino a la naturaleza de la piedra y a la redondez de su forma» [224].

Lo que hace que empiece a rodar el cilindro es la causa preliminar, mientras que el movimiento efectivo de rodar responde a la causa determinante. Justamente es mediante esa distinción con lo que la física teórica de hoy afronta los problemas de dinámica. Para resolver el problema del movimiento de un sistema, los físicos modernos introducen en la ecuación del movimiento todas las «causas determinantes», es decir, las propiedades que pertenecen al sistema mismo y las fuerzas que actúan sobre él; pero con esto no basta, ya que sólo nos proporciona una solución general abstracta. Para descubrir la situación del sistema en cada instante y para un caso concreto, hemos de determinar sus condiciones iniciales, es decir, su posición y velocidad en un cierto momento, en la «hora cero». Esas condiciones, junto con la solución teórica, proporcionan una definición completa del movimiento y aplican la ley de causalidad al caso dado.

Las condiciones iniciales son análogas a las «causas preliminares» de la doctrina estoica del destino. Mediante esas condiciones se logra abrir una brecha artificial en la cadena infinitamente ramificada de causas y efectos, a fin de dar al problema una forma que permita una solución práctica. Las condiciones iniciales definen cierta situación que es el resultado de desarrollos causales y cuyos detalles podemos no examinar o no necesitar examinar. Puede que la piedra cilíndrica en cuestión haya sido arrojada por la rampa por alguien, o podría haber rodado anteriormente por esa misma rampa, o incluso podría haberse desgajado de otra roca y caído libremente hasta chocar con la rampa. Todo cuanto precede al momento que nos interesa para el problema —la suma total de las causas preliminares»—

se incluye bajo el rótulo «destino», sin que importe la complejidad de los detalles. Pero esta parte de la historia no es la que nos interesa; únicamente tomamos nota de su último lazo como condición de partida para el problema que tratamos de resolver.

Crisipo, en su deseo de tener lo mejor de los dos mundos, trató de preservar el hado mediante «condiciones iniciales» a las que los hombres estarán sujetos en todo momento cuando tengan que tomar una decisión, y que escaparán a su control. Al mismo tiempo esperaba dejar la puerta abierta al libre albedrío postulando que las cualidades innatas de los hombres están sujetas a autocontrol, a diferencia de las de la materia inorgánica. Este intento le llevó a un penetrante análisis de cómo funciona la ley causal en un caso concreto como el ilustrado por la piedra en la rampa. El ejemplo es sólo un detalle de una imagen general que nos revela en la física estoica, más nítidamente quizá que en cualquier otra teoría filosófica de la Antigua Grecia, un penetrante análisis del método científico o del razonamiento científico aplicado a un objeto equivocado o mezclado con supersticiones carentes de valor.

La astrología y la adivinación, que ocuparon un lugar preeminente en la doctrina física estoica, procedían sin duda de Oriente, y poseían un fuerte elemento de irracionalidad. Es interesante ver cómo trataron los estoicos de emplazar la adivinación sobre una base racional. En el uso de signos externos y símbolos por parte de los adivinos descubrieron los estoicos el método inductivo mediante el que es posible predecir un evento futuro a partir de la experiencia pasada de la conexión temporal existente entre ese evento y los que le precedieron. «Los resultados de los recursos artificiales de adivinación, que utilizan entrañas, relámpagos, portentos, y la astrología, ha sido objeto de observación durante un dilatado período de tiempo. Pero en todo campo de investigación una gran extensión de tiempo dedicada a la observación continuada da lugar a un extraordinario fondo de conocimientos que podría haber sido adquirido incluso sin la intervención o inspiración de los dioses, ya que la observación repetida pone en claro qué efectos se siguen de determinada causa y qué signos preceden a cualquier evento dado» [225].

El principio de inducción se usa aquí de la misma forma cautelosa con que Hume intentó adoptarlo como base para la ley de causalidad, una relación de eventos en el tiempo. Esa cautela no es, por supuesto, lo mismo que una negación directa de la conexión causal

entre ciertos signos y los eventos que les siguen; la cuestión queda obviamente abierta. La adivinación parte del supuesto de que la secuencia constantemente recurrente de los mismos signos y eventos puede ser expresada como una regla que justifica la profecía, sea ésta realmente una ley causal o una simple repetición de coincidencias. «De acuerdo con la doctrina estoica, los dioses no son los responsables directos de cada una de las fisuras en el hígado o del canto de un pájaro, ya que, como es manifiesto, esto no sería ni propio ni adecuado para un dios, y además es imposible. Pero en el principio, el universo fue creado de tal modo que ciertos resultados fuesen precedidos de ciertos signos, proporcionados unas veces por las entrañas y las aves, otras por los relámpagos, los portentos naturales, las estrellas o los sueños, y en otras ocasiones por los pronunciamientos de personas en trance. Y estos signos no suelen engañar a quienes los observan adecuadamente. Si algunas profecías basadas en deducciones e interpretaciones erróneas resultan ser falsas, la culpa no ha de ser atribuida a los signos, sino a la escasa habilidad de los intérpretes» [226].

La cita anterior pone de relieve la dependencia que sobre el experimento tiene la ley de inducción («observación durante un largo período», «observación repetida»). Esta última referencia subraya además el carácter axiomático de la ley resultante de ese experimento, la creencia en que el universo está gobernado por la ley: «El universo fue creado de tal modo...». A fin de apreciar todo el éxito de los estoicos en la cuestión de la inducción y la causalidad, hemos de olvidarnos por un momento de toda la superstición que rodea a la adivinación, pues lo que importa es que los estoicos captaron un principio de vital importancia para el proceso de comprensión de la naturaleza: el principio de la confirmación mutua. «Crisipo da otra prueba en el libro mencionado anteriormente: 'las predicciones de los adivinos no podrían ser correctas si el destino no fuese omniabarcante'... Parece que Crisipo basaba su prueba en la interdependencia de las cosas; así, mediante la verdad de la adivinación quiere mostrar que todo ocurre de acuerdo con el hado, mas no puede probar la verdad de la adivinación sin suponer primero que todo ocurre de acuerdo con el destino» [227]. El comentarista aquí citado no entiende del todo que esta crítica es en realidad un elogio de la intuición intelectual de Crisipo. De hecho las ciencias naturales están basadas en la confirmación mutua por la cual cada nuevo dato de

evidencia inductiva refuerza la ley de causalidad al tiempo que la postulación de esa ley aumenta nuestra confianza en que una cierta cadena de eventos no es arbitraria. Crisipo apela aquí a una de las categorías fundamentales de la epistemología de la ciencia. Lo que no deja de ser peculiar es que no fueran sino los signos científicos de los adivinos los que dieran lugar a tales conclusiones epistemológicas; además, como es bien sabido, no fue ésta la única ocasión en los anales de la ciencia en la que se extrajeron conclusiones correctas de premisas falsas.

La idea de causalidad no progresó en el mundo antiguo más allá de la noción estoica de hado. La razón obvia para que así fuese fue ante todo la pobreza de la experimentación sistemática, pero también está claro que el significado religioso que se dio al hado, y la tendencia a identificarlo con la providencia, impidieron cualquier desarrollo científico ulterior. No obstante, hubo un enorme avance desde la primera idea vaga de una conformidad general a la ley en la naturaleza hasta la idea de necesidad de Demócrito, y desde ésta a la aprehensión clara de la ley de causa y efecto lograda por Crisipo. Este desarrollo resulta particularmente sorprendente si consideramos la ley de causalidad como parte del problema general de la interconexión de eventos y su dependencia temporal, marco más amplio en el que también se incluye el concepto de probabilidad y el tema de la conexión funcional entre los fenómenos. Por tanto, deberíamos repasar brevemente también los logros conseguidos en este campo si queremos conseguir una estimación adecuada de los esfuerzos intelectuales por entender la estructura causal de las cosas que se produjeron en el período postaristotélico.

De Pitágoras en adelante, una vez que había pasado a formar parte del bagaje cultural de los individuos la absoluta certeza de una proposición matemática demostrable, la palabra griega para «probable» se utilizó como opuesta a certeza matemática, en el sentido de «plausiblemente, aparentemente correcto». «No presentas ninguna prueba concluyente, sino que usas la probabilidad. Si Teodoro y otros geómetras la hubiesen utilizado en geometría, habrían carecido de valor» [123]. Un comentario semejante de disgusto ante la inexactitud se deja oír en el siguiente pasaje: «Esta asunción no ha sido, en mi opinión, demostrada y está basada en cierta verosimilitud y conveniencia, razón por la cual es aceptada por la mayoría de la gente. Pero yo soy consciente de que los argumentos que fabrican

sus demostraciones por medio de verosimilitud, son embaucadores, y si uno no se pone en guardia contra ellos, le engañan con toda facilidad, tanto en geometría como en todos los demás asuntos» [120]. Platón, el autor de estos extractos, entendió bien que el conjunto de la ciencia natural no es más que probabilidad, pero mientras que a él comprender esto le llevó a desdeñar la ciencia experimental, Aristóteles —aunque estuviera de acuerdo en principio con esa actitud— subrayó el valor práctico de la investigación: «Platón llamaba correctamente ciencia natural a la doctrina de lo probable. Esa es también la opinión de Aristóteles, quien declara que la prueba real es la que se deriva de los principios primeros y seguros, de las verdaderas causas primeras, lo que no significa que hayamos de abandonar las ciencias naturales por carentes de valor, sino tan sólo que deberíamos contentarnos con lo que pueda beneficiarnos y caiga en nuestras manos, como también enseñaba Teofrasto» [172].

Fueron el progreso de la medicina y de la diagnosis médica, más que cualquier otra ciencia experimental, lo que ganó el primer reconocimiento de la importancia de todo un amplio abanico de conclusiones basadas en la probabilidad, en las que el principio guía no es la necesidad lógica sino la confianza en la recurrencia regular de los eventos gracias a la necesidad causal. Ese reconocimiento tuvo, a su vez, una notable influencia sobre la lógica; en la lógica de Aristóteles el primer lugar estaba ocupado por las proposiciones categóricas y los silogismos, mientras que su discípulo Teofrasto comenzó a desarrollar el silogismo hipotético. Más adelante las sentencias hipotéticas y disyuntivas se convertirán en el aspecto central de la lógica estoica. Esos silogismos también fueron utilizados antes que nada en matemáticas; en términos formales, el silogismo hipotético («si *a* entonces *b*») es típico de la fórmula matemática. «Si uno de los ángulos de un triángulo es recto, entonces el cuadrado de la hipotenusa es igual a la suma de los cuadrados de los catetos». Lo mismo vale para el disyuntivo («si *a* entonces *b* o *c*», etc.) como muestra el sencillo ejemplo siguiente: «Si un número se divide por tres, el resto será cero, uno, o dos». Formalmente hablando, estos silogismos son aplicables a todo lo empírico y, de hecho, en los ejemplos que aparecen en la literatura estoica y subsiguiente podemos seguir la penetración gradual de este tipo de silogismo en el mundo de la experiencia, bien en la experiencia cotidiana, bien en los fenómenos naturales ordinarios, bien en la práctica de los adivinos en la predic-

ción del destino de una persona o de los futuros acontecimientos históricos. Lo que resulta especialmente sorprendente en toda esta interesante evolución son las dificultades que aparecieron a la luz de la discusión de los silogismos que contienen el factor tiempo («Si *a* entonces a continuación *b*»; o, en el silogismo disyuntivo, en el que son posibles varios desarrollos alternativos: «Si *a* entonces *b* o *c*»). Estas dificultades, que discurren como un hilo a lo largo de la literatura estoica, desde los estoicos antiguos a los comentaristas posteriores, brotan de la aparente incompatibilidad entre la idea de posibilidad y la necesidad del destino. Hado significa la necesidad rotunda por la que las cosas se mantienen en dependencia mutua, significa ausencia de elección. Mientras que la disyunción, tal y como se aplica a la experiencia, ramifica los cursos futuros, distinguiendo entre varias ocurrencias posibles. Mas, ¿hay realmente posibilidad? Sólo una cosa puede ocurrir de hecho, y ésta se convierte así en ocurrencia necesaria mientras todas las demás se ven como imposibles. ¿Cuál es el lugar de lo posible entre los polos gemelos de lo necesario y lo imposible? La controversia en la que se vieron envueltos los estoicos con los filósofos anteriores fue estéril, pero es pese a todo digno de destacar su característico empeño por mantener el concepto de posibilidad dentro del marco de su doctrina del destino, como puede verse en la polémica entre sus intérpretes y sus oponentes: «¿Cómo puede no haber una contradicción entre la doctrina de las ocurrencias posibles y el destino? Si, de hecho, la categoría de lo posible no abarca lo que es o lo que será verdad como postula Diodoro, sino que el término posible ha de aplicarse a todo lo que puede que ocurra, aunque nunca vaya a ocurrir, habrá muchas cosas posibles que el control absoluto e indiferente del destino impedirá que ocurran. Si el hado es realmente como suponía Crisipo, o su fuerza debe debilitarse o lo que parece que podría suceder debe convertirse en imposible en la mayoría de los casos, ya que todo lo que existe es necesario puesto que forma parte de la suprema necesidad, y todo cuanto no existe es imposible, pues la causa más poderosa le impide acceder a la existencia» [228].

La posición de los estoicos fue aún más claramente enunciada por otro de sus críticos: «Hay quienes incluirían lo posible y lo probable en todo lo que ocurre por destino, definiendo lo posible como algo a lo que no se impide suceder, incluso aunque no suceda —'nada

impide la ocurrencia de aquello que incluso es contrario a lo que sucede por el destino, ya que aunque no ocurra es, sin embargo, posible'...— ¿No son acaso los que así argumentan como bufones?» [229].

Esa limitación de las ocurrencias posibles a «aquellas a las que no se impide suceder» es importante porque muestra que los estoicos iban por el buen camino para captar la idea de probabilidad como nosotros, con nuestra amplia concepción de la causalidad, lo hacemos hoy. En lugar de describir la ocurrencia *actual* mediante una serie de pasos que se combinan para formar una cadena unidimensional, nosotros describimos la totalidad de las ocurrencias *potenciales* (todos los eventos que pueden suceder dentro del marco de una ley dada o unas combinaciones determinadas) como una estructura multidimensional de posibilidades que están sujetas a la condición de que «no haya nada que impida su ocurrencia, incluso aunque no ocurran». En un juego de dados, por ejemplo, el número de resultados posibles en una tirada se limita al número de combinaciones posibles; en el caso de la existencia de los átomos de un gas en un tubo descargado, el complejo de posibilidades está determinado por todos los estados energéticos posibles del átomo. En ambos casos cada una de las ocurrencias posibles tiene un índice de probabilidad específico que a veces puede calcularse o determinarse por algún otro medio.

Ya que la certeza sólo existe en el caso de un evento que ya ha sucedido y pertenece, por ende, al pasado, nos hemos acostumbrado desde siempre a considerar la conformidad a la ley de los acontecimientos futuros, como un complejo de posibilidades accesibles a nuestra investigación. Consideramos además la existencia de ese complejo y la ponibilidad de expresarlo en términos numéricos, como una manifestación de la causalidad. A fin de apreciar la importancia del intento de Crisipo por encajar la posibilidad en el marco del destino, deberíamos considerarlo a la luz del desarrollo moderno de los conceptos involucrados.

Es natural preguntarse a estas alturas si los griegos llegaron a alguna formulación cuantitativa de la probabiildad, aunque fuese al nivel más elemental —como sucede con los primeros pasos del cálculo infinitesimal. El silogismo disyuntivo y el concepto de posibilidad marcan el punto de partida del cálculo de probabilidades. A este respecto, se había abierto el camino para futuros desarrollos teóri-

cos; pero no sólo a este respecto, sino que también hubo otras circunstancias que favorecieron ese avance. Como bien sabemos, el desarrollo de la teoría matemática de la probabilidad en la época moderna —siglos XVI y XVII— fue puesto en marcha por el deseo de los jugadores de naipes y dados de saber cuáles eran sus oportunidades de ganar. Ahora bien, sabemos que los juegos de azar eran muy populares en todas las épocas de la Antigüedad (de hecho, nunca se han dejado de practicar desde los tiempos más remotos hasta nuestros días); es razonable suponer, por tanto, que dichos juegos contribuyeron al desarrollo que estamos considerando. Pero sin embargo hemos de hacer notar con asombro que, al contrario, pese a la presencia y popularidad de los juegos de azar, éstos no tuvieron una influencia demostrable sobre el pensamiento científico en ninguno de los períodos de la cultura greco-romana. No podemos encontrar ninguna referencia a la formulación de los conceptos fundamentales de probabilidad, frecuencia o evento constantemente recurrente; ni hay mención alguna a las regularidades que aparecen en las series aleatorias (ley de grandes números), al margen de las formulaciones rudimentarias ofrecidas a modo de ilustración. Podría decirse que el medio en el que tenían lugar los juegos de azar no era tan elevado culturalmente como para afectar al mundo del pensamiento científico o merecer alguna atención en la literatura seria. Pero no es así. Por el contrario, dichos juegos eran comunes en todas las clases de la sociedad antigua; muchos emperadores romanos eran conocidos por su pasión por los dados y el emperador Claudio llegó a publicar un libro sobre el juego. Pero incluso antes, en la Grecia de los siglos V y IV a.C., los juegos de azar eran una costumbre en todos los círculos; así, por ejemplo, Platón en su *Lisis* describe cómo Sócrates penetró en la palestra el día de la fiesta de Hermes y encontró a los jóvenes jugando a los dados al final de los sacrificios. La puntuación de los dados era idéntica a la actual, a saber, cada cara tenía un valor diferente de uno a seis, y estaban dispuestas de tal manera que la suma de las dos caras opuestas fuera siempre siete. Un pariente de los dados eran las tabas, hechas con el astrágalo de una oveja, que se describen en el capítulo segundo de la *Historia Animalium* de Aristóteles. A diferencia del dado simétrico, la taba era un obloide que tenía por dentro cuatro superficies de tamaños diferentes, una convexa, la opuesta cóncava, y de las dos restantes una estaba ligeramente hundida. Las superficies llevaban los números 1,

3, 4, 6, pero el valor numérico de una superficie no guardaba relación con la frecuencia con la que podía salir en las tiradas. Obviamente con este objeto natural asimétrico las oportunidades de cada una de las caras en una tirada eran distintas, mientras que las de las caras de un dado son idénticas —supuesto que no esté cargado. La ausencia de relación entre la puntuación tradicional de las tabas y la frecuencia con que aparecían las caras en una tirada revela la carencia de interés por las leyes del azar. Más pruebas en este sentido pueden encontrarse en las reglas del juego, o, más exactamente, en la ausencia de conexión entre tales reglas y las más simples leyes de probabilidad. Normalmente se arrojaban cuatro tabas a la vez y a cada una de las treinta y cinco combinaciones posibles se le daba el nombre de algún dios o héroe de la mitología, no siendo necesariamente su valor el total de los números que habían aparecido. En algunos juegos el valor más alto era el de la combinación que en cada taba mostraba un número diferente, es decir, 1, 3, 4, 6, aunque esa combinación fuese mucho más frecuente que la correspondiente a cuatro caras con el mismo número. Según otras reglas, era el total más alto que podía obtenerse, es decir, 6, 6, 6, 6. El rasgo más característico del juego es que no había regla alguna que hiciese depender la victoria del resultado de series de lanzamientos; en todas las versiones del juego, con sus diferentes sistemas de puntuación, se ganaba o perdía con *una* ronda de tiradas de los jugadores, y esto es otra prueba de la ausencia de interés por la ley que subyace a ocurrencias de este tipo, un asunto que se tratará en un capítulo posterior, ya que merece cierta indagación.

Los juegos de azar que dieron lugar a una investigación teórica de las leyes del azar en la época moderna fueron justamente aquellos en los que se ganaba por la aparición de un cierto número en cada una de las secuencias de lanzamientos. Esto llevó a la gente a estudiar la relación que mantenían los *eventos probables* con respecto a todos los *posibles,* o con otras palabras, al concepto de expectativa y cuanto está conectado con él. En el Mundo Antiguo, en lugar de calcular las permutaciones, los hombres se concentraban en la rapidez de la mano, en la destreza del jugador para sacar el número deseado con el dado o la taba; o, si no se había hecho ningún intento de «probar fortuna», confiaban en la suerte ciega o en la fortuna individual. «Nadie puede convertirse en un diestro jugador de dados» —dice Platón en su *República*— «si no se ha dedicado a ello desde

la infancia, sino que sólo juega por placer» (el contexto en el que se dice esto es la preparación profesional de los artesanos). Generalmente, sin embargo, el juego de dados se cita como un ejemplo clásico de lo impredecible. Al final del último libro de las *Leyes* platónicas, el ateniense subraya que no podemos pensar por adelantado en todos los detalles la constitución, pero que en muchos casos puede seguirse un procedimiento de ensayo y error: «Con la constitución debemos correr el riesgo de sacar o tres veces seis o tres veces uno». La mejor posibilidad se compara aquí con el máximo que puede obteneres con tres dados, y la peor con el mínimo obtenible.

También Aristóteles tiene un ejemplo en su *De Caelo*, que recuerda al citado por Platón al subrayar los dos extremos: «Es difícil acertar en muchas cosas o muchas veces. Así, por ejemplo, repetir la misma tirada de dados diez mil veces sería imposible, mientras que hacerlo una o dos veces es comparativamente más fácil» [159] *. Esta es en apariencia la expresión más cuantitativa de un ejemplo de la ley de probabilidad que puede hallarse en la literatura clásica, y confirma nuestra impresión general de que toda una esfera de pensamiento, que es una de las piedras angulares de nuestro concepto de la vida, estaba ausente en la conciencia intelectual de Grecia y Roma.

Antes de concluir este capítulo deberíamos hacer alguna mención a otro tipo de interdependencia fundamental, la dependencia funcional que es ahora parte integral de la ciencia moderna y cuyas primeras pistas se encuentran en la Antigua Grecia. En nuestros tiempos la función se ha convertido en un modo de observar las variables en términos de su interdependencia, pero el proceso comenzó realmente con la matematización de la física —que siguió al desarrollo de las ecuaciones y de la geometría analítica— y, especialmente, con la descripción geométrica del movimiento como un cambio de lugar funcionalmente dependiente del tiempo.

La observación de una clase de variables en su relación con otra, que puede variar a su vez como resultado de su dependencia de la primera, exige un cierto enfoque dinámico. Requiere, además, una comprensión más amplia de la idea de continuo, ya que los

* Hemos respetado la traducción inglesa escogida por Sambursky, en la que se hace referencia a un tiro de dados, aun cuando en el texto griego se habla del tiro de Quíos —una de las posiciones del juego de la taba—, puesto que en nada altera el sentido de la afirmación aristotélica. (*N. del T.*)

cambios en las variables ocurren normalmente de manera continua. Por tanto, no debería sorprendernos hallar los primeros conatos de función en los estoicos, a la vista de que su cosmos estaba constituido por elementos dinámicos como el pneuma y la tensión, y era de naturaleza estrictamente continua.

La transición de cantidades constante a variables puede verse también en la lógica estoica, en la que —como se apuntó antes— se concedió gran importancia al silogismo disyuntivo. Además de la disyunción, consistente en la distinción de diversas posibilidades («o la noche o el día»), los estoicos definieron igualmente la proposición comparativa, que distingue posibilidades en una escala ajustable («más de día que de noche», o «más de noche que de día»). Esta es una variante interesantísima de la disyunción usual y nos recuerda a la lógica multivaluada de nuestro tiempo. Si tomamos el día como unidad (luz plena=100% de luz), y la noche como cero (carencia de luz=0% de luz), entonces la proposición comparativa reemplaza la alternativa «uno o cero» por una escala variable de todos los estados entre cero y uno. Así, el mundo del pensamiento exacto fue enriquecido con uno de los elementos del concepto de función, la variable continua. Otro elemento —la relación entre cantidades— aparece en la teoría estoica de las categorías; así, la relación se define como una de las cuatro categorías principales, y como ejemplo ofrece la literatura estoica el concepto de padre, que es dependiente de su relación con el hijo, o el concepto de vecino de la derecha, que depende de la existencia de un vecino a la izquierda. Crisipo cita el ejemplo de la bóveda cuyas piedras se sostienen mutuamente. Esa categoría le lleva a definir la propiedad de un objeto en términos de la actividad que depende de su relación con otro objeto: «En lo tocante a lo que sucede en el aire, los estoicos decían que el invierno es el enfriamiento del aire situado sobre la Tierra debido al alejamiento del Sol, mientras que la primavera es el entibiamiento del aire debido a la aproximación del Sol hacia nosotros. Verano es el calentamiento del aire situado sobre la Tierra por el desplazamiento del Sol hacia el norte, mientras que el otoño se produce cuando el Sol vuelve a alejarse de nosotros» [230]. Las estaciones del año se definen aquí claramente en términos de dependencia funcional, la dependencia del clima respecto a la posición del Sol; la posición solar es aquí la variable independiente y sus continuos cambios inducen cambios en la variable dependiente, en el

clima que determina el carácter de cada estación. Todo esto muestra que el concepto de función nació en tiempos de Arquímedes y Eratóstenes, pero su descubrimiento nunca fue continuado, y jamás fructificó en la antigua ciencia griega, que por entonces había alcanzado su punto álgido. Hubo dos razones para que así fuese: la carencia de una geometría analítica y la incapacidad para aprehender el tiempo como una variable independiente que tenía como función suya a los fenómenos.

Capítulo VIII

COSMOGONIAS

«¿Se engendra todo un país en un solo día?».

Is. 66, 8

La ciencia griega nos parece un continuo esfuerzo por racionalizar la naturaleza, cuyo resultado fue la gradual ampliación del concepto de ley a todas las esferas del universo físico.

Hasta aquí hemos trazado varios aspectos de este proceso y su influjo sobre la descripción de los fenómenos físicos del cosmos, pero para completar este estudio deberíamos añadir un repaso de las antiguas cosmogonías desde los filósofos jonios hasta los estoicos.

El término «cosmogonía» se aplica a cualquier descripción o explicación de la creación del cosmos, de las mitologías precientíficas que aparecen en los pueblos antiguos, a las teorías científicas de nuestros días que incorporan todo nuestro conocimiento experimental y teórico. La cosmogonía científica aspira a describir la formación del universo por medio de todas las leyes científicas y datos disponibles en el presente, y dado que por la naturaleza de su objeto se ve obligada a aplicar sus conclusiones a períodos muy remotos de la historia del mundo, no puede estar enteramente libre de elementos especulativos que la dominaban en los tiempos antiguos. En cosmogonía, más que en cualquier otra rama de la ciencia, nos hacemos conscientes de que el cambio del mito al logos no fue un salto brusco, sino un continuo desarrollo, y en muchas mitologías antiguas puede encontrarse una racionalización intencionada del proceso de creación.

En los doscientos años que precedieron al comienzo de la filosofía griega, gran parte de la antigua tradición y de las leyendas sobre el nacimiento de los dioses y el cosmos penetró en la literatura griega, siendo especialmente destacable la *Teogonía* de Hesíodo, que ejerció una profunda y duradera influencia en las generaciones posteriores.

El rasgo más destacable de todas esas mitologías es la personificación de las fuerzas de la naturaleza y de sus cruentos conflictos intestinos, frente a la cual el primer capítulo del Génesis parece sumamente científico y racional. En éste la descripción de los seis días de la creación nos presenta la ordenada disposición actual del cosmos que emerge del caos primitivo conforme a la palabra del Creador —que actúa como causa suprema de su evolución— une lo que estaba separado en una secuencia natural de eventos.

Un ejemplo característico de la creación de orden a partir del desorden es el proceso de separación de los opuestos contenidos en el todo indiferenciado tal y como se describe maravillosamente en el Génesis 1: «Y separó Dios la luz de la tiniebla; «E hizo Dios la bóveda para separar las aguas de debajo de la bóveda, de las aguas de encima de la bóveda». Esa separación, que es simplemente la diferenciación de la materia informe, es también el principio básico de la primera cosmogonía científica sobre la que se modelaron todas las posteriores; su autor fue Anaximandro: «Afirma que lo que produce lo caliente y lo frío desde la eternidad se separó al nacimiento de este mundo, y que de ello nació una esfera de llamas en torno al aire que circunda la tierra como la corteza en torno al árbol. Cuando ésta (la esfera) se rompió en trozos y se cerró en ciertos círculos se formaron el Sol, la Luna y las estrellas» [6]. Hemos visto que la materia primigenia de Anaximandro es el infinito que no puede ser definido cualitativamente; así, según él, la creación del mundo comenzó cuando cierta porción de esa masa informe se separó del resto, poniendo en marcha el proceso de diferenciación que produjo los comienzos del orden mediante la distinción de dos cualidades opuestas, lo caliente y lo frío. El significado de esa separación es doble. En primer lugar significa, en la terminología de la física moderna, que todo acontecimiento físico en el cosmos solamente puede producirse por la existencia de una diferencia potencial que haga posible la transición de un nivel a otro, por ejemplo, la diferencia térmica en el potencial gravitacional o eléctrico, etc. Por esta razón,

la tarea de toda cosmogonía, de Anaximandro a nuestros días, es explicar cómo se producen esos gradientes en un entorno homogéneo que no los contenía. En segundo lugar —y por lo que hace al caso particular del contraste elegido por Anaximandro— nuestro cosmos exhibe la separación especial del frío, localizado en la tierra, del calor, que se encuentra en los cielos, y el modo en que se genera esa división requiere igualmente una explicación científica.

¿Cuál fue la causa de la separación original? Varias fuentes doxográficas proporcionan la respuesta a esta pregunta: «El (Anaximandro) encontró el origen de las cosas no en el cambio de la materia, sino en la separación de los opuestos —a partir de lo ilimitado— mediante un movimiento sin fin» [5]. Lo que nos muestra que la más antigua cosmogonía científica era de naturaleza estrictamente mecánica y que el objetivo de Anaximandro era explicar la formación del cosmos sobre principios físicos, admitiendo tan sólo causas naturales, por la misma vía racionalista por la que él y sus seguidores habían explicado los fenómenos que les rodeaban.

La naturaleza de ese movimiento eterno se clarifica a partir de otras fuentes, así como de la cosmogonía de la escuela atomista, construida sobre los principios de Anaximandro. El modelo utilizado —que más adelante examinaremos con detalle—, fue el movimiento circular de un remolino de agua o de aire. Se pensó en la materia primigenia como si ésta girase en un torbellino en virtud de alguna cualidad inherente, pero ni Anaximandro ni los atomistas se preguntaron cómo surgió ese movimiento: existe desde toda la eternidad y es inseparable de la materia. Igualmente, al discutir la teoría atomista, vimos que Demócrito y sus seguidores aceptaron el movimiento de los átomos como un principio último, una cualidad inexplicable que ha de asumirse para describir la naturaleza visible. En el caso de la explicación cosmogónica hay, sin embargo, una diferencia importante. El movimiento de los átomos en el vacío fue representado como si no observase orden o dirección fija algunos —se producía según las leyes de la estadística. El movimiento del torbellino, por su parte, no carece de orden, sino que es una revolución de toda la materia primigenia en una dirección. Así, la asunción de su existencia desde el principio implica el abandono de un importante aspecto de la hipótesis general acerca de un primitivo estado de completo caos cuando nació el mundo. Esto explica la crítica de Aristóteles, presente en las siguientes afirmaciones: «Hay también

quienes atribuyen al azar tanto la causa de este firmamento como la de todos los mundos; pues del azar, dicen, nacen el remolino y el movimiento que, mediante separación, llevó al universo a su orden actual» [113]. Por supuesto, Aristóteles va más allá y a partir de su punto de arranque teleológico destierra cualquier posibilidad de que el orden surja del movimiento circular que obedece a leyes mecánicas. Pero, aunque no aceptásemos su enfoque teleológico, podríamos considerar objeciones pertinentes a la formación de ese movimiento 'espontáneo'.

La separación del calor y el frío por el movimiento turbulento lleva —según Anaximandro— a la concentración del elemento frío en el centro y del calor en la periferia del remolino, adoptando la forma de una esfera de fuego. Entre ambos opuestos queda encerrada una especie de tierra de nadie aérea. Debido al momento del torbellino, la esfera de fuego se fragmentó en una serie de ruedas envueltas en aire y niebla. Los cuerpos celestes serían aberturas en esos envoltorios cuyas revoluciones continúan reflejando el movimiento circular del vórtice originario.

El centro frío estaba compuesto de dos «elementos fríos» en combinación, la tierra y el agua. Gracias a la acción del calor, parte de la humedad se evaporó, mientras el resto del agua se combinaba para formar el océano que continúa evaporándose.

Partiendo de las fuentes doxográficas parece poco probable que Anaximandro aceptase que existiera un número infinito de universos simultáneamente (cf. cita 6 en pág. 29) y que cada uno de ellos hubiera sido creado mediante un proceso que comenzaba con la separación de una unidad de materia primordial del conjunto de lo infinito: «Declaró que la destrucción, y mucho antes la generación, acontecen desde tiempo infinito, puesto que todos ellos tienen lugar cíclicamente» [6]. No se nos dice cómo imaginaba Anaximandro los detalles de esa transición del orden a la desintegración, ni sabemos cómo le condujo ese método de proporciones a una explicación natural de la creación, a concebir el proceso opuesto a éste. Pero esa cuestión podría obviamente plantearse en justicia sobre el progreso de creación; puesto que el cosmos no proporciona una clara evidencia de su formación o destrucción, habría sido más plausible asumir que es eterno.

Posiblemente la creación y destrucción cíclicas de mundos, que hallamos en las antiguas mitologías, indican que se dio un valor uni-

versal a la periodicidad de la naturaleza —especialmente en lo tocante a las estaciones del año— y se la proyectó al plano cósmico. Así el cosmos mismo se vio sujeto al ciclo eterno de generación, florecimiento y decadencia que se revela —por así decir— en miniatura en el ciclo de las estaciones terrestres y otros fenómenos meteorológicos.

Aristóteles hace hincapié una y otra vez en la universalidad del proceso: «Ahora bien, en la naturaleza se observa un cierto tipo de proceso circular de generación... En hechos concretos se ejemplifica así: cuando la tierra se había humedecido, se vio obligada a formarse una exhalación, y cuando ésta se hubo formado, se vio obligada a surgir una nube, y a partir de la formación de la nube se produjo necesariamente la lluvia, y con la caída de la lluvia la tierra se humedeció necesariamente, y como éste había sido el punto de partida, el ciclo ya estaba completado» [140]. Este 'pequeño' ciclo sin duda sirvió como modelo de la formación y destrucción cíclica de todo el cosmos. Al final del ciclo el cosmos retornaría a una absoluta igualación de los opuestos y sus elementos, como ocurre constantemente en la escala menor de los fenómenos meteorológicos. La analogía encuentra ulterior evidencia en la doctrina de Heráclito, quien dijo que la humedad que surge de los ríos y mares proporciona al Sol y a las estrellas su combustible; así, el fuego fue incorporado al ciclo de los elementos y la doctrina heraclítea —sobre la que volveremos después— sería adoptada luego por los estoicos.

En Aristóteles aprendemos por qué se escogió el vórtice como modelo: «Si se debe a una constricción el que la tierra esté ahora en reposo, también se deberá a una constricción que se sitúe en el medio al ser transportada por el torbellino. Y tal es, en efecto, la causa sobre la que todos concuerdan y se basan en lo que sucede en los líquidos y en el aire, donde los objetos más grandes y pesados son siempre arrastrados hacia el centro del remolino. Por esa misma razón pretenden todos aquellos que sostienen que el mundo ha tenido un comienzo, que la Tierra ha sido llevada hasta el centro» [66]. Los movimientos turbulentos del aire, los torbellinos, son fenómenos comunes; los aspectos físicos de su proceso aerodinámico son muy complicados, pues involucran muchos factores entre los que se incluyen la fricción al pie del vórtice que es una fricción entre el aire y la tierra. El movimiento de una pelusa de polvo o de las hojas que caen girando en el viento muestran la dirección de la velocidad

y la cuantía de ésta en diversos puntos del remolino. El polvo ligero es elevado por el viento y arrastrado con el movimiento rotatorio general, mientras que los cuerpos pesados, que el viento tiene suficiente fuerza como para levantar, permanecen estáticos en el centro de la turbulencia. Allí se juntan con otros próximos al centro y que son empujados hacia él en círculos que decrecen de manera continua por un movimiento de fricción. Este tipo de vórtices era un modelo enormemente vívido y adecuado del modo en que se pensaba que el cosmos geocéntrico se había formado, y permitió a los primeros cosmólogos indicar el mecanismo por el cual el material pesado fue apilado en el centro mientras el ligero y raro giraba en torno a éste. El proceso de separación podía, por tanto, explicarse a partir del momento del vórtice.

En épocas modernas se ha añadido preeminencia al valor del movimiento rotatorio para cualquier explicación cosmogónica conforme ha ido aumentando la evidencia de su universalidad. Galileo descubrió la rotación del Sol sobre su eje y el perfeccionamiento del telescopio ha revelado la rotación axial de los planetas, que Platón había postulado *a priori*: éstos giran alrededor del Sol en uno y el mismo sentido; junto a ellos, las estrellas dobles que giran en torno a un centro común de gravedad son un fenómeno frecuente en nuestra galaxia.

Un estudio más atento de las unidades superiores del cosmos, las nebulosas extragalácticas, no ha dejado dudas de que el movimiento rotatorio se halla en sus masivos sistemas. A la vista de la estructura de las galaxias con sus brazos expandiéndose desde un centro denso y curvándose en espiral en torno a él, es difícil resistirse a concluir que su rotación es de naturaleza turbulenta. Así pues, las últimas cosmogonías que aspiran a explicar la estructura del cosmos y la formación de las galaxias han vuelto al modelo del vórtice, aplicando las leyes de la hidrodinámica a los problemas cosmogónicos. Las leyes de la mecánica nos dicen que para una cantidad dada de movimiento rotatorio en un sistema, debe haber una cantidad igual y en sentido opuesto en ese mismo sistema u otro que haya estado en contacto con él. En otras palabras, la rotación no puede ser creada de la nada. De ahí que, si hubiera muchos sistemas podría asumirse que todos los distintos sentidos de rotación se distribuyen estadísticamente entre ellos. Cualquiera que sea el mecanismo por el cual surgieran las rotaciones en el estado primigenio del caos que

precede a la creación del universo, está claro que el desorden estadístico ha de prevalecer también en lo que respecta al movimiento rotatorio del cosmos como un todo. Pero con respecto a un sistema que está desde el principio aislado de cualquier otro, o con respecto al cosmos de los cosmólogos griegos, compuesto de la Tierra en el centro y los cielos a su alrededor, la pregunta de Aristóteles es sumamente pertinente: ¿cómo pudo formarse «espontáneamente» el vórtice?

El primer intento moderno serio de hacer una cosmogonía, la teoría de Kant, tropezó con la misma dificultad que Anaximandro. En su ensayo *Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels [Historia general de la naturaleza y teoría del cielo]* (1755), Kant trataba de proporcionar una explicación mecánica, basada sobre la ley de la gravitación de Newton, de la formación del sistema solar. Uno de los rasgos más sorprendentes de este sistema es el sentido uniforme de sus rotaciones (salvo por unas pocas excepciones que pueden ser desdeñadas) tanto en los movimientos del Sol y los planetas sobre sus ejes, como en las revoluciones de los planetas alrededor del Sol o en la revolución de los satélites; Kant postulaba que la masa de todo el sistema estaba dispersa por todo el espacio al comienzo de la creación y que el proceso empezó con el movimiento gravitacional de las partículas donde por azar se dio una excesiva cantidad de materia. Siendo como era inconsciente de la ley de conservación del momento rotacional, Kant supuso que a partir de esa anárquica disposición de las partículas moviéndose desordenadamente en corrientes por todas partes en una sola dirección, y al mismo tiempo colisionando entre sí, emergió espontáneamente una rotación uniforme en uno y sólo un sentido. Laplace y los cosmólogos siguientes evitaron el error de Kant, asumiendo que un estado de rotación lenta existía ya en la masa original a partir de la cual se desarrolló el sistema solar. Esa rotación se transmitió a todas las partes del sistema que se habían desconectado de ella. Laplace guardó silencio sobre la causa de esa rotación originaria, aunque estaba claro para él que tenía que residir fuera del sistema solar.

Anaxágoras fue posiblemente el primero en percibir la enorme dificultad que involucraba la creación de un vórtice a partir de la nada, tal como sugería Anaximandro, y propuso una solución al problema. En su doctrina encontramos la Mente como fuerza que proporciona orden al cosmos. El término «mente» sugiere un algo no-

físico y, de hecho, parece por los fragmentos de Anaxágoras que se conservan que es algo distinto de la materia, y que no es un compuesto elaborado a partir de «las semillas de la materia» —como él las llama. Sin embargo, la yuxtaposición de ambas nos inclina a pensar que la mente es también esencialmente física. Podría parecer que Anaxágoras propuso una especie de versión atomista de la fuerzas de amor y odio de Empédocles, en la que la mente sería un tipo de fuerza, y una de sus funciones primordiales consistiría en la puesta en movimiento del primer vórtice, con lo que se marcaría el inicio de la creación: «La Mente gobernó también la rotación universal, de tal manera que todo comenzó a girar en el comienzo. Empezó a girar, primero, a partir de un área pequeña, ahora gira sobre una mayor, y girará sobre otra aún mayor. Conoce todas las cosas mezcladas, separadas y divididas. La Mente ordenó todas cuantas cosas iban a ser, todas cuantas fueron y ya no son, todas cuantas ahora son y cuantas serán, incluso esta revolución en la que ahora giran las estrellas, el Sol, la Luna, el aire y el éter, que están siendo separados. Lo denso se separa de lo raro, lo cálido de lo frío, lo brillante de lo tenebroso, y lo seco de lo húmedo» [57]. A partir de este fragmento y de las críticas de Aristóteles, parece que la Mente de Anaxágoras actúa como una causa natural dentro del conjunto de las leyes de la naturaleza, y nada tiene que ver con el fin teleológico del cosmos aristotélico: «Anaxágoras, en efecto, usa el Entendimiento como recurso para la formación del mundo, y sólo cuando desconoce la causa de algo necesario echa mano del Entendimiento; pero, en todos los demás casos, cualquier cosa le parece causa de lo que deviene, antes que el Entendimiento» [67].

Según otro fragmento, el momento de la rotación aumentó constantemente hasta superar todas las revoluciones terrestres, tal como se muestra en el movimiento de los cielos. La frase del fragmento [59] de que las piedras fueron expelidas hacia fuera más que el agua concuerda con lo que hemos aprendido acerca de la teoría de Anaxágoras sobre la naturaleza del Sol y las estrellas: para él eran piedras que se habían tornado ígneas debido a la velocidad de su rotación [62, 63].

El intento de Anaximandro de explicar la formación del cosmos por medio de un mecanismo natural fue adoptado por la escuela atomista, que adaptó las ideas fundamentales de esta cosmogonía a sus propios principios básicos. Los atomistas reemplazaron la materia pri-

maria continua y carente de cualidades que precedía a la creación, por los átomos diversamente conformados que se amontonaban desordenadamente en el espacio infinito. También aquí es el vórtice cósmico lo que reduce el caos a orden, pero esta vez, sin embargo, no lo hace dividiendo los opuestos, sino por un proceso de criba que recolecta los diferentes tipos de átomos y los apila unos encima de otros hasta que el conglomerado se convierte en los cuerpos macroscópicos dotados de características definidas. El paralelo más cercano a este proceso es agitar una criba de un lado a otro de modo que separe los granos según su tamaño, o alguna otra actividad mecánica que produzca la separación de partículas homogéneas. Una ilustración muy clara del proceso se encuentra en un fragmento de Demócrito: «Las criaturas vivas se asocian con las de su tipo, como hacen las palomas con las palomas, las grullas con las grullas, y así todos los demás animales. Y lo mismo sucede con las cosas inanimadas, como puede verse en la criba de semillas y con los guijarros en las playas. En el primer caso con el movimiento de la criba las judías se separan y disponen con las judías, los granos de cebada con los de cebada, y el trigo con el trigo; en el segundo caso, con el movimiento de las olas, los guijarros ovalados son llevados al mismo lugar que los ovalados, y los redondos que los redondos, como si la similaridad en estas cosas tuviera una especie de poder sobre ellos que los hiciera reunirse» [90].

La cosmogonía de Leucipo —la primera de las cosmogonías atomistas— contiene muchos detalles que, en el estado en el que han llegado hasta nosotros, no están muy claros. El hecho de descender linealmente de la cosmogonía de Anaximandro se deja sentir especialmente en la idea de la separación de una unidad de la masa infinita y, asimismo, en la ausencia del menor indicio sobre el origen del vórtice. Aunque los atomistas postularon que el movimiento —como la forma— era una cualidad inherente al átomo, la cuestión esencial quedaba en pie, como ya hemos visto: ¿qué explicación puede darse para la creación de un movimiento rotatorio ordenado y en un sentido único, surgido del movimiento total desordenado y sin dirección? «Y así nacieron los mundos; nacieron por doquier: separados del infinito muchos cuerpos de todo tipo y figura que son arrastrados por el gran vacío y congregados unos cerca de otros formando un único vórtice. En él, conforme entraron en colisión unos con otros y fueron agitados girando de mil maneras posibles, se fueron sepa-

rando unos de otros y uniéndose los semejantes a sus semejantes. Equilibrándose y no pudiendo ya moverse por similitud y peso, aquellos de entre ellos que eran más pequeños salieron hacia fuera, hacia el vacío externo como si pasaran por una criba, y los demás permanecieron juntos y se entrelazaron, precipitándose juntos hacia abajo y formando una primera estructura esférica. Esta concreción se separa de los demás por medio de una piel o membrana que contenía dentro de sí todo tipo de cuerpos. Estos cuerpos ya unidos en masa, girando sobre la consistencia de su centro, van formando otra tenue membrana circular, compuesta de las partículas que atrae a su superficie a tenor de su giro. De este modo se forma la tierra, a saber, permaneciendo juntos los corpúsculos tendentes al centro. Este mismo cuerpo va aumentando siempre por membranas, formadas por corpúsculos externos que de allí concurren y adquiere, al tocarlos, por la fuerza de su giro. Esta concreción es al principio húmeda y fangosa; luego, secándose con el violento giro del todo e inflamándose, produce la naturaleza de los astros, siendo el círculo del Sol el más externo, el de la Luna el más cercano a la Tierra, y estando los demás astros en el espacio intermedio. Todos los astros se inflaman con la violencia del movimiento, aunque el Sol se inflama también por el influjo de las estrellas. La Luna, sin embargo, sólo recibe una pequeña porción de fuego» [83].

De nuevo encontramos en este pasaje los mismos pasos en la separación de los elementos por los cuales las partículas más finas son situadas en el perímetro, mientras las más groseras se amontonan en el centro. La envoltura epidérmica se expandió y creó los cielos, en cuya vastedad las aglomeraciones de partículas finas se encendieron en estrellas mientras la masa del centro se solidificó, formando el globo terráqueo.

Aunque no ha llegado hasta nosotros ninguna información detallada sobre la cosmogonía de Demócrito, las escasas referencias que se encuentran en Diógenes señalan un cambio de opinión con respecto a Leucipo: «Los átomos... son arrastrados girando por el vórtice en el vacío y así se formaron todos los compuestos, fuego, agua, aire y tierra. Hay estructuras hechas de átomos... El Sol y la Luna están compuestos de átomos lisos y redondos, como el alma... todo fue creado por necesidad, ya que el vórtice es la causa de la creación de todo y él lo denomina necesidad» [112]. Podría parecer ante este fragmento que Demócrito identificaba los átomos finos

que fueron expelidos hacia el perímetro con los «lisos y redondos» átomos del fuego. Si ese fuera el caso, no sería la velocidad de rotación la que habría puesto en ignición los cuerpos celestes —como Leucipo, siguiendo a Anaxágoras, dijo—, sino la aglomeración efectiva de átomos ligeros de fuego en un lugar. Otra fuente, sin embargo, proporciona una imagen distinta y parece indicar que, en opinión de Demócrito, el Sol fue creado en primer lugar como el centro oscuro de un cosmos concreto, y que después se prendió fuego al absorber los átomos de fuego: «El cuenta la creación del Sol y la Luna. Estos solían moverse independientemente, no teniendo nada de la naturaleza del calor y sin brillo alguno, muy al contrario, tenían una naturaleza como la de la tierra, pues cada uno de ellos fue formado al principio como el cimiento de un cosmos autónomo. Más tarde, sin embargo, conforme la esfera del Sol creció, el fuego se vio atrapado en su interior» [94]. Lo interesante en el primero de estos dos pasajes es la insistencia que se hace en la necesidad; es decir, la ley de causalidad, en relación con el vórtice. Demócrito —aunque aparentemente era incapaz de explicar los detalles de su formación a partir del movimiento general de los átomos— comprendió la gran importancia de este aspecto y, por ello, reiteraba que «todo fue creado según necesidad», y que el vórtice mismo —la causa de todo— es simplemente necesidad. Su negativa a admitir la existencia de fuerzas y su insistencia en que los movimientos e impactos de los átomos eran la base de todo le obligaron a adoptar esa posición, pero aunque no pudiera imaginar el mecanismo por el que el vórtice hubiese podido surgir, creía que ese mecanismo tenía que existir y concordar con las leyes de causalidad. Posiblemente la intención era criticar implícitamente la Mente ordenadora de Anaxágoras.

Otro aspecto de la cosmogonía atomista era la creencia en un gran número de mundos en constante proceso de creación y destrucción. En lo tocante a la destrucción de mundos, Demócrito dio con una nueva idea: el orden se destruye por la colisión de un cosmos con otro; este pensamiento se expone en el texto siguiente, que es digno de atención por varias razones: «Hay innumerables mundos que difieren en tamaño. En algunos no hay ni Sol ni Luna, en otros el Sol y la Luna son mayores que en el nuestro, y en otros son más numerosos. Las distancias entre los mundos son desiguales; en algunas direcciones hay más mundos y en otras menos; algunos están creciendo, otros están en su plenitud, y algunos otros están decre-

ciendo; en una dirección están naciendo, en otra pereciendo. Su destrucción se produce por la colisión de uno con otro. Algunos mundos carecen de vida animal y vegetal y de toda humedad. En nuestro mundo, la tierra nació antes que las estrellas; la Luna ocupa el lugar más bajo, después el Sol, y tras ellos las estrellas fijas. Los mismos planetas no están a iguales alturas. Un mundo continúa formándose hasta que deja de ser capaz de atraer hacia sí lo exterior» [114]. La razón de los atomistas para limitar temporalmente el cosmos es expuesta con claridad por Lucrecio: «Ya que los elementos de que vemos está compuesto el mundo... están formados por cuerpos que no son ni increados ni inmortales, hemos de creer que lo mismo pasa con el mundo como un todo... Así, cuando vemos desintegrarse y renacer a los principales integrantes del mundo, la inferencia apropiada es que cielo y tierra también tienen nacimiento y tendrán su día de deceso» [253].

Ya hemos hablado más arriba de Epicuro, quien desarrolló las doctrinas de Leucipo y Demócrito. Vimos que, aunque su mayor contribución fue el desarrollo de los detalles de la teoría atomista, no exhibió originalidad alguna en la elaboración de sus fundamentos. Su contribución más importante fue la acuñación del concepto de «asociación de átomos», es decir, de molécula. Su cosmogonía aparece en una carta a Pitocles: «Un mundo es una porción de cielo circunscrita que contiene cuerpos celestes, una tierra y todos los fenómenos celestes cuya disolución ocasionará que todo devenga confusión en su interior; es una pieza extraída del infinito y que termina en una frontera rara o densa, giratoria o estacionaria; su figura puede ser esférica, triangular o de cualquier forma... Y de que tales mundos son infinitos en número podemos estar seguros, así como de que un mundo puede nacer tanto dentro de otro como en el espacio intermundano —con lo que nos referimos al espacio que hay entre diferentes mundos. El nacimiento ocurrirá en un espacio con muchos huecos, y no en un enorme espacio vacío —como dicen algunos—, y tiene lugar cuando las semillas del tipo requerido se han precipitado en él procedentes de un único mundo o espacio intermundano o de varios; poco a poco las semillas se unen y articulan y dan lugar a cambios de posición, como bien podría suceder, produciendo emisiones de la materia adecuada hasta el momento de la completud y estabilidad que durará tanto en los cimientos internos sean capaces de recibir añadidos. Porque no es estrictamente ne-

cesario que suceda una reunión de átomos, ni un torbellino —por supuesto— y mucho menos que sea puesto en movimiento —como se supone ocurre por necesidad en un espacio vacío en el que es posible que nazca un mundo—, ni puede el mundo continuar aumentando hasta colisionar con otro —como uno de los llamados filósofos físicos dice. Porque eso contradice los fenómenos [184]. En esta cosmogonía Epicuro censura a Leucipo y Demócrito, y la primera parte de su crítica encierra parte de verdad: «tal mundo podría surgir en un lugar con muchos huecos y no en un gran espacio vacío». Esa puntualización iba dirigida contra los vestigios de la concepción de Anaximandro que se encuentran en la descripción de Leucipo de una unidad separada de lo ilimitado y trasladada a un vacío en el que el cosmos se habría formado, ya que el espacio es, después de todo, una mezcla de huecos y átomos fuera del cual no queda lugar alguno en el que pudiese ocurrir el nacimiento del cosmos.

Pero la cuestión aún sigue en pie: ¿cómo fueron creados nuestro cosmos ordenado y todo el número infinito de mundos —cuya existencia también concede Epicuro— a partir de esa masa confusa de átomos? Epicuro no encuentra en el modelo del vórtice una descripción adecuada del comienzo del movimiento; en su opinión hemos de explicar con detalle el surgimiento del movimiento a partir de la situación anterior, y no refugiarnos en el mero término «necesidad», como hizo Demócrito.

Pero tras esta crítica podemos esperar en vano a que Epicuro subsane esa deficiencia, pues, por el contrario, deja las cosas peor de lo que estaban. El habla de la creación de un mundo a partir de átomos que han escapado de otro o que han llegado del espacio y se han acumulado entre los mundos. ¿Supone que esos átomos fluyen en línea recta con velocidad uniforme como en la descripción de Lucrecio? (cf. [248], pág. 192). ¿Comenzó la condensación cósmica con la famosa desviación de la línea recta que introdujo el libre albedrío en la creación? Epicuro no mencionada nada de ello en relación a su cosmogonía. Pero incluso si supusiéramos que tal es el caso, ¿cómo imaginaba las siguientes etapas de la creación? Quizá las concibiera como un gran número de pequeños movimientos rotatorios que al final se conjugan formando el vórtice, o tal vez considerara ese único vórtice como algo superfluo e imaginara que todos los cuerpos celestes y la Tierra se habían formado a partir de varios pequeños vórtices. Pero la descripción paralela de Lucrecio no arroja

nueva luz sobre el problema: «Ciertamente los átomos no se colocaron ellos mismos en el orden debido como resultado de un acto inteligente, ni estipularon qué movimientos debía realizar cada uno de ellos. Por el contrario, multitudes de átomos moviéndose incontroladamente en cursos multitudinarios durante un tiempo infinito, debido a sus choques o a su peso, se han unido de todos los módos posibles y han dado lugar a cuanto podía formarse por su combinación. Así ocurrió que un viaje de inmensa duración, en el que han experimentado toda variedad de movimientos y conjunciones, al final ha unido a aquellos cuyo encuentro azaroso constituye normalmente el punto de partida de la estructura sustancial —tierra, mar, cielo, y las razas de los seres vivos» [254]. Una cosa queda, desde luego, clara: Epicuro (y Lucrecio después de él) subrayaron la importancia del desorden estadístico al comienzo de la creación y creyeron —como Kant siglos después— que habría «emergido» de ese completo desorden un estado de orden, es decir, que habrían «emergido» rotaciones ordenadas. Al fin y al cabo se requería una eternidad para la creación, y por tanto es inevitable que, de acuerdo con las leyes del azar, en algún momento se diesen combinaciones capaces de desarrollarse en un sistema ordenado que se expandiese constantemente. En principio, nada añade esto a Demócrito, salvo una representación pictórica del funcionamiento de su «necesidad», y por tanto muy bien podría suceder que Epicuro hubiese dado por hecho el lugar y función de la desviación incausada que era parte importante de su filosofía.

No obstante, también podría ser que la cosmogonía de Epicuro contuviese otra idea que, ésta sí, fuese una contribución original de verdadero valor científico. El ve el espacio infinito lleno de mundos de formas diferentes, formados todos ellos según las mismas leyes mecánicas. Estos mundos aumentan en tamaño repostando del material atómico infinito que está disperso en forma rara por todo el espacio intermundano. Ese aumento tiene un umbral superior que es fijado por las leyes propias de cada cosmos. Epicuro rechaza la opinión, sustentada por Demócrito, de que un cosmos puede continuar expandiéndose hasta colisionar con alguno de sus vecinos, y mantiene que el cosmos crece «mientras sus cimientos internos sean capaces de recibir añadidos»; pero, una vez que se alcanza el punto de saturación, procede a desintegrarse.

Permítasenos, al llegar a este punto, recordar la concepción epicúrea de las moléculas. El las representaba como asociaciones de átomos que tenían una estructura definida y se movían a través del vacío, del mismo modo que los átomos, y que son capaces de atraer hacia sí a cualquier átomo aislado de su entorno. Al mismo tiempo, las moléculas conservan su propia estructura peculiar pese a las vibraciones de los átomos que las componen, lo que sugiere una interesante explicación de la imagen del cosmos de Epicuro. El consideraba cada cosmos como una especie de enorme molécula dotada de una estructura bien definida y en un estado constante de intercambio con los átomos exteriores, viniendo determinadas las leyes de su crecimiento y estabilidad por la dinámica particular que mantiene unidas a sus partes. Una vez más, Epicuro despliega aquí su capacidad para la inferencia científica y la imaginación creativa que le permitió transferir los conceptos básicos y los modelos de la dimensión atómica a la cósmica. Y con ello nos recuerda a las cosmogonías de nuestro tiempo, que consideran asimismo aglomeraciones de estrellas como átomos de un gas, o que explican la dinámica de las nebulosas mediante las leyes de la hidrodinámica, siendo el principio guía el de que bajo ciertas condiciones las leyes concebidas para entidades pequeñas pueden aplicarse a entidades de mayores dimensiones.

En la doctrina estoica las concepciones de la formación y decadencia del cosmos recibieron un carácter diferente. Las ideas de la escuela estoica estuvieron considerablemente influenciadas por la filosofía de Heráclito (comienzos del siglo v a.C.), quien consideraba —como haría luego Empédocles— que la armonía prevalecía en el universo como fruto del equilibrio de fuerzas opuestas. Para Heráclito esta dinámica giraba en torno al fuego: «Todas las cosas se cambian por fuego, y el fuego por todas las cosas, como las mercancías por el oro y el oro por las mercancías» [37]. El Sol y las estrellas fueron creados de, y todavía son alimentados por, la evaporación del agua de la superficie de la Tierra, evaporación que es producida por el calor que alcanza a la Tierra desde los cuerpos celestes. Ese doble movimiento, hacia arriba y hacia abajo, es característico de la armonía de los opuestos mediante la cual existe un proceso simultáneo de generación y degeneración en el cosmos existente. Esta fue la primera teoría de Heráclito, como lo confirman los fragmentos de sus obras que se conservan, y de acuerdo con ellos hemos de interpretar el siguiente pasaje de Aristóteles: «Todos los pensadores

concuerdan en afirmar que el mundo ha sido engendrado, pero algunos lo consideran eterno, otros corruptible al igual que cualquier otro producto de una composición natural, y, finalmente, otros opinan que sometido a un ritmo alternativo, unas veces se encuentra como lo está ahora, otras cambiando y corrompiéndose, y que ese proceso prosigue irremisiblemente» [39].

La noción de un orden eterno del cosmos mantenido por un proceso simultáneo de creación y destrucción fue mezclada en la generación posterior a Heráclito con la idea de una creación y destrucción que ocurren consecutivamente, y con el proceso cíclico en el que el fuego desempeña asimismo un papel esencial; el cosmos se desarrolla a partir del fuego y regresa finalmente al fuego en un ciclo sin fin. Esta idea aparece en los mitos antiguos, pero los estoicos la incorporaron en su doctrina científica como una modificación de la teoría heraclitcana, convirtiéndole en una autoridad por su idea de una conflagración final del cosmos. Difícilmente ha de sorprendernos, por tanto, que los comentaristas tardíos y los compiladores completaran esa confusión al identificar la teoría de los estoicos con la de Heráclito: «También Heráclito dice que el cosmos es incendiado y formado de nuevo a partir del fuego en ciertos períodos temporales en los que —según él— es 'incendiado conforme a medida y apagado conforme a medida'. A esa misma idea también llegaron más tarde los estoicos» [40].

Hemos visto que en la física estoica el fuego ocupaba una posición especial entre los elementos en virtud de su carácter activo. Ellos fueron los primeros en captar el valor clave de los procesos termodinámicos en la naturaleza cosmogónica, lo mismo que en biología, donde su gran importancia ya había sido reconocida con anterioridad. Es pues fácil entender por qué la cosmogonía estoica fue también erigida sobre la noción del fuego como símbolo de los fenómenos térmicos: «Zenón dijo que el fuego es la esencia de cuanto existe... En algunos períodos de tiempo determinados por el destino, todo el cosmos estalla en conflagración y tras ello retorna a su orden anterior» [190]. Esa doctrina del fundador de la escuela fue desarrollada por sus seguidores: «Zenón, Cleantes y Crisipo mantuvieron que la materia sufre transmutación; así, por ejemplo, el fuego se convierte en semilla a partir de la cual una vez más es restaurado en el mundo el mismo orden que el que había existido

anteriormente» [191]. El proceso de emergencia del cosmos a partir del estado primario representado como un fuego primigenio es esencialmente la diferenciación de los otros tres elementos, partiendo del fuego: «Crisipo, en su primer libro *De la Naturaleza,* dice: la transmutación del fuego se produce del modo siguiente, primero se convierte en aire, luego en agua, y el aire se eleva sobre el agua, en cuyo fondo se deposita la tierra. Conforme el aire se rarifica, el éter se expande en un círculo y las estrellas y el Sol se incendian desde el mar» [231]. Este es el primer estado de la creación, en el que la naturaleza del continuo cósmico se define principalmente por los elementos cálidos y secos. La emergencia del aire como un segundo elemento a partir del fuego es representada basándose en la analogía del ascenso del humo y el aire caliente desde las llamas. Ese aire (incluyendo todo tipo de vapor) se condensa después en agua y de aquí en adelante el desarrollo sigue dos direcciones distintas, hacia abajo con la sedimentación de la tierra en el agua, y hacia arriba, con la evaporación de vapores que mediante rarificación se convierten en fuego, pasando dicho fuego a aglomerarse formando los cuerpos celestes. Esto completa la creación del universo físico que continúa manteniéndose vivo mediante el equilibrio dinámico de Heráclito. Parece, sin embargo, que ese equilibrio entre el agua de los mares y el fuego del Sol es sólo una primera aproximación a la realidad, pues en la escala temporal cósmica es el fuego el que predomina. Evidencia de ello puede hallarse en algunos indicios geológicos (ya puestos de relieve por los filósofos naturales pre-estoicos), como la presencia de conchas en tierra firme, lo que muestra que el mar ha retrocedido, o algunos cambios meteorológicos lentos que tienen lugar a lo largo de centurias: «Pantanos y humedales se hicieron habitables con la desecación, mientras que lugares que habían sido habitables previamente, se hicieron inhabitables por el aumento de la desecación, lo que se explica por el cambio y la decadencia del universo. A partir de esos signos hay quienes, como Heráclito y sus seguidores, así como los estoicos, piensan que finalmente habrá una conflagración del universo» [232].

A partir de ello se sigue que no hemos de considerar la conflagración del cosmos como un fuego real, como un tipo de holocausto que en un momento destruye todo el cosmos; el proceso, de hecho, es extremadamente lento, como todo proceso cósmico, siendo iguales

las proporciones de degeneración y generación. Al final será restaurada la situación de partida, y el elemento activo dominará las vastas extensiones del universo, que así renacerán a partir del fuego primigenio. Teniendo ante nosotros la cosmogonía «térmica» de los estoicos, es difícil no recordar la «muerte térmica» del universo, idea que fue objeto de numerosas controversias entre los físicos decimonónicos cuando la segunda ley de la termodinámica se aplicó al universo como un todo. Todo proceso físico conduce en última instancia a un incremento de la energía térmica; así, tras equilibrarse las temperaturas, el universo alcanzará un estado final similar al estado final del cosmos de los estoicos.

Aunque la mente humana se vea razonablemente sobrecogida ante la perspectiva de un fin absoluto e irreversible, se han propuesto varias soluciones físicas para salir del dilema, permitiendo al universo sobreponerse al punto final de ese último aliento. La mecánica estadística explica los fenómenos términos como energías cinéticas de los átomos y moléculas. En el estado final del universo el movimiento de todas esas partículas elementales será el de un desorden ideal y sus velocidades serán iguales estadísticamente hablando. Ahí es donde la estadística da un paso al frente salvando la situación: en medio de una gran fluctuación, es plausible que ocurra una desviación de la media estadística en algún momento, tal como lo explica la ley de grandes números. Un gran número de partículas dotadas de una velocidad considerablemente superior a la media se aglomerará en un lugar, y la diferencia de potenciales resultante producirá una renovación de la vida del cosmos.

Así, la mecánica estadística ofrecía una posibilidad de ciclos cósmicos sin fin de creación y destrucción de modo bastante semejante al de la concepción estoica. Como corolario de esta imagen estadística del cosmos, el antiguo problema del «eterno retorno de lo idéntico» vuelve a la vida en los debates filosóficos del siglo pasado. Si el estado del cosmos viene definido por una cierta combinación de sus partículas últimas, y si cada combinación es el producto —de acuerdo con las leyes de la causalidad— de su predecesora, se sigue de ahí que en última instancia —y una vez que todas las permutaciones posibles se hayan satisfecho— se repetirá todo el ciclo de las combinaciones anteriores. De ahí que la idea de los ciclos cósmicos, cuando se considera en términos de números, implique la repetición

idéntica del presente, un hecho que sería moldeado por filósofos como Nietzsche de acuerdo con las exigencias de su propia doctrina. Lo más interesante es observar cómo la misma lógica interna que ha ligado en nuestros tiempos termodinámica, mecánica estadística, e idea del «eterno retorno de lo mismo», fue también una fuerza impulsora en el pensamiento griego. También entonces, y dentro de los límites de la comprensión y terminología científicas de la época, las ideas sobre el valor cosmológico de los procesos térmicos estaban estrechamente conectadas con las teorías sobre la formación y destrucción del cosmos, y sobre el retorno idéntico de una situación dada.

De los estoicos se nos dice que «en su opinión, tras la conflagración del cosmos todo volverá de nuevo a estar en orden numérico, hasta que también cada una de las cualidades específicas regresa a su estado originario, justo como había sido antes y se había generado en aquel cosmos. Esto es lo que dice Crisipo en su obra *Del Cosmos*» [233]. Y una afirmación aún más clara se encuentra en otra fuente que cita las palabras del propio Crisipo en la obra de éste *De la Providencia*: «Obviamente, no es imposible que, tras nuestra muerte, cuando hayan pasado largos evos, volvamos a la forma que tenemos en el presente» [234]. En Eudemo de Rodas —un discípulo de Aristóteles y el primero en escribir la historia de la astronomía en el Mundo Antiguo— encontramos que Pitágoras había anticipado la concepción estoica del retorno de lo mismo. En el siguiente pasaje, Eudemo se dirige a un alumno durante su clase: «Uno puede preguntarse si retornarán los mismos tiempos —como dicen algunos— o no... Si uno fuera a creer a los pitagóricos en sus manifestaciones de que las mismas cosas individuales (en cuanto a su número) van a retornar, entonces yo os volveré a hablar tal y como estáis sentados, llevando en mi mano este mismo bastón, y lo mismo ocurrirá con todas las demás cosas, y es lógico suponer que el tiempo será entonces el mismo que ahora. Pues el movimiento es uno y el mismo, y al igual que la secuencia de varias cosas que se repiten es una, y lo mismo se aplica al número, así también todo será idéntico, incluido el tiempo» [36].

Vemos, por tanto, que los pitagóricos, como los estoicos después de ellos, trataron también de asentar la teoría de los ciclos cósmicos sobre bases científicas, en términos de su teoría del número en su

caso. Incluso aunque no concebían la teoría de las permutaciones ni tenían la más remota idea de la ley de grandes números, los pitagóricos se dieron cuenta de que el número por su propia naturaleza incorpora un cierto orden determinado por ley. La periodicidad de los movimientos cíclicos simboliza la periodicidad de todo evento cósmico, y, por ende, la del tiempo mismo. Ya hemos visto en otro fragmento estoico [233] que también los estoicos participaban de esa idea pitagórica de repetición «en orden numérico» y redondeaban la imagen física de su cosmogonía haciendo uso de la terminología matemática.

Los estoicos, inflexibles como eran en su idea de que el mundo físico es un continuo, supusieron que «más allá del cosmos se agolpa un vacío infinito, no-físico» [206]. Este espacio vacío desempeñó un papel importante en su cosmogonía por la siguiente razón. Al término de cada ciclo cósmico, cuando el elemento caliente deviene predominante, el cosmos se expande térmicamente y así crece su volumen. Ahora, el problema planteado por este incremento de volumen puede resolverse si el cosmos es, como asumieron, una isla en un vacío infinito. Los discípulos de Aristóteles, que, como su maestro, mantenían que el cosmos era finito y negaban la extensión infinita del espacio, rechazaron esta teoría estoica. Toda esta cuestión se convirtió en tema de controversia científica entre las dos escuelas, controversia que muestra un notable parecido con la moderna discusión cosmológica sobre el espacio y la estructura de la materia en él. Se nos dice en una fuente estoica: «Aristóteles y su escuela mantienen también que si hubiera vacío más allá de los confines del cosmos, toda la materia se filtraría hacia el infinito, esparciéndose y disipándose. Pero nosotros mantenemos que esto nunca podría suceder, ya que la materia tiene una coherencia que la mantiene unida y contra la cual carece de poder el vacío envolvente. Pues el mundo material se autoconserva gracias a una inmensa fuerza, que alternativamente se contrae y expande en el vacío siguiendo sus transmutaciones físicas, consumido unas veces por el fuego, comenzando otras de nuevo la creación del cosmos» [243]. La cohesión del cosmos es el producto de la tensión del pneuma, como sabemos por la doctrina estoica. Esa fuerza cohesiva, que ata entre sí las partes del cosmos formando una única entidad, sobrepasa la influencia disipadora del vacío infinito envolvente, y hace del cosmos un universo cerrado, cuya unidad no se ve viciada por cambios de tamaño. Aquí hallamos

una inconfundible analogía con la argumentación de las cosmologías relativistas modernas. De nuevo vemos cómo la lógica interna de las estructuras del pensamiento científico han permanecido inalterables a lo largo de los siglos y del ir y venir de las civilizaciones: los mismos modelos y asociaciones recurren, sólo que en los estadios más avanzados alcanzados por el conocimiento físico se visten de nuevas formas.

Capítulo IX
LOS COMIENZOS DE LA ASTROFISICA

«¿Por dónde se va a la morada de la luz? Y las tinieblas, ¿dónde tienen su sitio?».

JOB 38, 19

Tras la época dorada de la ciencia griega de los siglos III y II a.C., se produjo un rápido declinar de la creatividad científica. Finalmente, tras algunos renaceres de importancia secundaria, ese declive se transformó en la decadencia general de la cultura antigua, a partir del siglo IV d.C. Desde la época de Aristarco, Arquímedes y Eratóstenes —en el siglo III— y de Hiparco —en el II— no se hicieron más contribuciones originales importantes a dos de las ramas principales de la ciencia antigua, las matemáticas y la astronomía. Ptolomeo —hacia el 150 a.C.— fue básicamente un compilador e intérprete de doctrinas astronómicas previas, aunque también trabajase en óptica geométrica, como su contemporáneo Herón lo hiciera. Tampoco hubo algo comparable a la contribución al pensamiento científico de Epicuro y los estoicos, tras Lucrecio y Posidonio en el siglo I a.C. El contenido científico de las doctrinas filosóficas subsiguientes era débil y poco original.

Por otro lado, el siglo I d.C. marca el inicio del trabajo de compiladores e intérpretes que perduraría cuatrocientos años y sería el espejo en que vemos reflejada una gran parte de la antigua ciencia griega. La tendencia ecléctica que apareció por vez primera en filosofía durante el siglo I de nuestra era y que condujo a desfigurar y barajar las doctrinas de las diferentes escuelas, también dejó su impronta en los puntos de vista científicos asociados a dichas escuelas.

Sin duda los devotos adhesores a cada escuela adoptaron sus teorías físicas peculiares, pero en la conciencia intelectual general de los círculos cultivados de la época, tales teorías comenzaron a ser entremezcladas, de modo que la física estoica fue combinada con la aristotélica, e incluso con elementos presocráticos. Todo esto fue el resultado de los tremendos logros de la «ciencia» pura del período alejandrino. Las mediciones y cálculos astronómicos de Aristarco, Hiparco y Posidonio, la determinación de la circunferencia de la Tierra por Eratóstenes, la expansión del conocimiento geométrico, todo ello reforzó la tendencia a ser críticos con los puntos de vista sobre el cosmos proporcionados por las escuelas filosóficas y alentaron el enfoque ecléctico.

Hay un ensayo científico escrito hacia el año 100 d.C., que ha preservado para nosotros un vívido y colorido cuadro de las opiniones y argumentos corrientes en esa época en los círculos ilustrados de Atenas y Roma. En él hallamos, por así decirlo, un destilado de la ciencia, filosofía y mitología de los cuatrocientos años que separan a Empédocles de Posidonio. El autor es Plutarco y el título del ensayo —una de sus obras físico-filosóficas— es «De la cara de la Luna». Formalmente es una conversación entre varios hombres pertenecientes a diferentes escuelas filosóficas, versados todos ellos en la historia de la ciencia griega desde sus tiempos más antiguos. Su contenido es lo que, en terminología moderna, llamaríamos un ensayo de astrofísica, quizá la primera obra de astrofísica jamás escrita.

La astrofísica aplica los métodos y conclusiones de la física a la astronomía y, por tanto, está principalmente condicionada por los logros prácticos y teóricos de aquélla. Hoy la termodinámica, la teoría cuántica, la espectroscopía y la física nuclear conjuntamente ayudan al científico en la comprensión de la estructura del Sol y los planetas, de las diversas clases de estrellas fijas y de las nebulosas.

El ensayo de Plutarco trata de física lunar y emplea argumentos —extraídos básicamente de la dinámica y la óptica— notables por su progresiva intuición de la gravitación, y por suponer la transición de la óptica geométrica a la física.

Existe un extraño contraste entre los últimos capítulos del libro, que discuten la mitología lunar y, en particular, su función como receptáculo de las almas de los muertos, y los otros capítulos que se caracterizan por la claridad y agudeza de su razonar científico —en la mejor tradición de su tiempo—, tal como, por ejemplo,

podamos hallarlas en el poema de Lucrecio anteriormente y en las obras de Ptolomeo más tarde.

La discusión científica parte en el libro de las opiniones cosmológicas del estoico Posidonio (135-51 a.C.), que incorporan asimismo una teoría sobre la naturaleza física de la Luna. Posidonio, como Aristóteles, distinguía dos zonas diferenciadas en el cosmos, una entre la Tierra y la Luna, y la otra por encima de ésta. La parte inferior, cercana a la Tierra, está compuesta por vapor y comprende la atmósfera, cuya altitud Posidonio estimaba era de cuarenta estadios, es decir, alrededor de siete kilómetros. Desde ahí hasta la Luna (de cuya distancia a la Tierra no andaba lejos Posidonio en sus estimaciones) hay una extensión de aire puro. Más allá de la Luna comienza el reino del fuego en que giran Venus, Mercurio, el Sol y los demás planetas, y, finalmente, las estrellas fijas. La Luna, al girar en la frontera entre el dominio terrestre de la Tierra y el aire, y el reino celeste de los anillos de las espirales de fuego estelares, es —según Posidonio— «una mezcla de aire y fuego débil» [240].

Así como se forman manchas en la superficie del mar cuando la riza el viento, así el aire oscurece partes de la superficie de la Luna, dándole de ese modo la apariencia de un rostro humano. Plutarco, que se opone a esa idea, trata de probar por todos los medios argumentativos que la Luna es un cuerpo del mismo tipo que la Tierra, opinión que resulta ajena a la tradición aristotélica que concentra todos los cuerpos pesados en la Tierra, que es el centro del universo.

Plutarco expone algo de naturaleza similar a una teoría general de la gravitación, en lo que aparentemente está no poco influenciado por la doctrina estoica del pneuma, ese pneuma que actúa por doquier como fuerza cohesiva de todas las partes del cosmos. «Si todos los graves convergen hacia uno y el mismo punto, al tiempo que cada uno presiona desde sus partes hacia su propio centro, no será entonces tanto *qua* centro del universo, sino *qua* todo, por lo que la Tierra se apropiará de los pesos, que son partes de sí misma; y la tendencia de los cuerpos será testimonio, no de que la Tierra sea el centro del universo, sino de que las cosas hayan sido expulsadas de la Tierra y regresen a ella, o de que tengan una cierta comunidad y semejanza natural con la Tierra. Así el Sol atrae todas las partes de que está compuesto y asimismo la Tierra tirará hacia sí de la piedra y la hará parte de sí... Pero, si algún cuerpo no ha sido asignado desde el comienzo a la Tierra y no le ha sido tomado pres-

tado a ésta, sino que de algún modo tiene una constitución y naturaleza propias, como ellos mantendrían es el caso de la Luna, ¿qué habría de impedir su existencia separada y su permanecer autocontenido, apelmazado y atado por sus propias partes? Pues no sólo no se ha probado que la Tierra sea un centro, sino que el modo en que presionan aquí las cosas y se dirigen juntas hacia la Tierra, sugiere el modo en que es probable que hayan caído las cosas sobre la Luna, estando donde están y permaneciendo ahí» [260].

La inclusión del Sol, así como de la Luna, en esta descripción de la gravedad general podría llevarnos a asumir que la distinción aristotélica entre pesado y ligero queda aquí completamente anulada. Sin embargo, las siguientes palabras del pasaje muestran —si es que no fueron escritas simplemente para anotarse un punto— que la intención primaria de Plutarco fue explotar la concepción de un centro *único* en vez de postular *varios* centros de atracción, independientemente de su «tipo». «¿Por qué los científicos, que comprimen todos los cuerpos terrestres pesados en un lugar y los convierten en partes de un cuerpo, no imponen la misma ley también a los cuerpos ligeros? ¿Por qué dejan separados a tan enormes sistemas de fuego? ¿Por qué no concentran todas las estrellas en un lugar, simplemente afirmando que todos los cuerpos ardientes que tienden hacia arriba deben ser partes del mismo cuerpo?».

Como se ha señalado, esta transformación del centro en una concepción general y relativa se debió en parte al pneuma que permeaba el cosmos, creando tensiones y fuerzas cohesivas en todas partes. (No hay que olvidar que Posidonio dio nueva profundidad y vigor a la idea del pneuma con su concepción de la simpatía cósmica.) Pero la duda específicamente planteada sobre que la Tierra sea el centro del universo apunta a una influencia ulterior, a saber, la teoría heliocéntrica de Aristarco que precedió a la «revolución copernicana» en mil ochocientos años y, por cierto, fue también conjeturada por otros en el Mundo Antiguo. Esta teoría no convenció a los contemporáneos de Aristarco (mediados del siglo III a.C.) y fue rechazada finalmente por una autoridad de la talla de Hiparco (mediados del siglo II), quien tomó partido por el enfoque geocéntrico hegemónico. Es, por tanto, interesante encontrar pruebas en las citas anteriores de que la idea heliocéntrica no fue olvidada, sino que aún siguió siendo influyente hasta los días de Plutarco y contribuyó a debilitar la creencia aceptada de que el universo tenía un centro absoluto.

En otro momento del debate Aristarco es mencionado por su nombre: «No me acuses de impiedad como Cleantes solía decir que les incumbía a los griegos con Aristarco de Samos por mover el hogar del universo, ya que trató de salvar los fenómenos por medio de la asunción de que el cielo está en reposo, pero la Tierra rota en una órbita oblicua mientras también lo hace sobre su propio eje» [235]. Recuérdese que estas palabras fueron escritas sólo unas pocas décadas antes de la *Sintaxis* de Ptolomeo, el libro que instauró la teoría geocéntrica para cuatrocientos años y, también según la tradición antigua, mantuvo la finitud del cosmos. Aristóteles había llegado a la conclusión de que el cosmos es finito a partir de la premisa de que la Tierra está en su centro, dado que no puede haber centro en una extensión infinita. En Plutarco encontramos invertida esta línea de argumentación. La primera influencia perceptible aquí es la conversión del centro en un concepto relativo; la segunda es la cosmología de los estoicos, quienes, al tiempo que mantenían la finitud del cosmos, postulaban no obstante la existencia de un vacío infinito que se extendía más allá de él. «¿Cómo y de qué puede decirse que es el centro la Tierra? Porque el universo es infinito, y al infinito, al carecer de principio y de límites, no puede dársele un centro. Pues la idea misma de centro implica un límite, en tanto que la infinitud es la negación de todo límite» [261]. Esta era la concepción, en el siglo XV, de Nicolás de Cusa, quien creía que el universo era infinito. Toda esta línea de argumentación y su conversa son sumamente instructivas para demostrar cómo la idea de un centro absoluto y la de la finitud del universo son intercambiables: derróquese una, sin importar cuál, e inevitablemente se estará derrocando a la otra.

Las asunciones aristotélicas de que los cuerpos pesados tienden al centro y de que la Tierra es redonda dan conjuntamente lugar a cuestiones que en aquellos tiempos parecieron paradójicas. Plinio (23-79 d.C.) resume en su *Historia Natural* algunos de los hallazgos realizados antes de sus días: el hecho de que la superficie del océano es parte de la superficie de un globo, visto que la superficie del agua es vertical con respecto a la dirección de la gravedad; y la noción de las antípodas que, en relación a nosotros, están justo debajo. También señala que la altura de las montañas (él menciona específicamente los Alpes) es desdeñable en comparación al radio de la Tierra, i.e. que las irregularidades de la superficie de la Tierra no vician su esfericidad. Estas conclusiones son conocidas por los inter-

locutores de *De la cara de la Luna,* quienes por su parte añaden otras concernientes a la fuerza interna de la gravedad *dentro* del orbe terráqueo. Algunas de ellas hacen pensar en ejercicios clásicos de la teoría de la gravitación de Newton. «No debemos escuchar a los filósofos si afirman oponer paradojas a las paradojas, y discutir las doctrinas sorprendentes inventando otras aún más extrañas y sorprendentes, como hacen con su idea del movimiento hacia el centro. ¿Qué absurdo no implica esto? ¿No comporta que la Tierra es una esfera, aunque contiene simas y alturas e irregularidades tan enormes? ¿Que la gente mora en nuestras antípodas, como carcomas o lagartijas, pegándose a la Tierra con sus extremidades inferiores hacia arriba? ¿Que nosotros mismos no nos mantenemos erguidos al caminar, sino inclinados, y nos balanceamos como borrachos? ¿Que masas de un millar de talentos, hundidas en la profundidad de la tierra, se detienen al llegar al centro, aunque nada las soporta ni topa con ellas; y que, si en su carrera descendente atravesaran el centro, darían la vuelta e invertirían su curso por sí mismas..., que una impetuosa corriente de agua que cayera, si llegara al centro, que ellos mismos declaran incorpóreo, se detendría quedando suspendida en torno a él, o dando vueltas en torno a él, oscilando con una oscilación que nunca cesa y que nunca puede ser detenida? Un hombre puede, sin abjurar de sí mismo, obligarse a representarse como imaginables algunas de estas cosas en su inteligencia. Pero decir que las cosas entre nosotros y el centro están «debajo» y que las cosas debajo del centro están «arriba» de nuevo, sería dar la vuelta a todo y ponerlo patas arriba. Esto comportaría, por ejemplo, que si un hombre por simpatía con la Tierra tuviese el centro de ésta como su centro, tendría su cabeza arriba y sus pies también» [259].

Tenemos aquí una doctrina científica enunciada en forma de paradojas supuestamente derivadas de cierta teoría científica, y la forma no es de poca importancia pues lo que cuenta es la transformación aquí observable de la idea aristotélica de la tendencia hacia abajo de los cuerpos pesados, en un capítulo de la dinámica del campo gravitacional de la Tierra. Este proceso, como ya se ha señalado, es consecuencia de dos cosas: las ideas de los estoicos, especialmente de Posidonio, y los logros científicos de los siglos III y II. No cabe duda de que los hallazgos de matemáticos y astrónomos en esos siglos surtieron un efecto apreciable en la representación intelectual del cosmos a finales de la época clásica. La introducción de dimen-

siones geométricas en el espacio, la determinación cuantitativa de las distancias y tamaños de los principales cuerpos celestes, la primera concepción de las «distancias astronómicas» y su comparación con las medidas terrestres, dieron lugar a una amplia tendencia a examinar los fenómenos celestes desde la razón; algo que podría ser denominado un resurgimiento del enfoque de Anaxágoras, que había aventurado que el Sol y la Luna eran meras piedras inflamadas y conjeturado su distancia a la Tierra. Sin embargo, sólo en la época de Plutarco tuvo ese proceso racionalizador el apoyo de los hechos científicos de que carecía en el siglo V a.C. Es bastante aparente que ese progreso despertó la misma sensación de distanciamiento y objetividad con respecto a los fenómenos celestes que marcó el comienzo de la era moderna.

En el noveno capítulo de *De la cara de la Luna,* Plutarco hace uso de los argumentos científicos al citar datos procedentes del libro de Aristarco sobre los tamaños y distancias. Este probó que la distancia del Sol a la Tierra es más de dieciocho, y menos de veinte veces, la distancia de la Luna a la Tierra (proporción que en realidad resulta veinte veces menor de lo que es). A partir de ahí Plutarco argumenta que la Luna «pertenece» ciertamente a la Tierra y que la cercanía espacial reflejada en esas distancias astronómicas relativas prueba, asimismo, una cercanía de «parentesco», es decir, la naturaleza terrestre de la Luna. En otro lugar (el capítulo VI), utiliza argumentos similares contra aquellos que cuestionan el carácter «pesado» de la Luna. Sabemos —dice— por la sombra arrojada por la Tierra a través de la Luna durante un eclipse, que la Tierra es mucho mayor que ésta y, sin embargo, cuelga como una pesa en el vacío sin apoyo alguno; por tanto, es obvio que, a *fortiori,* ello puede ser cierto para una Luna que es menor.

Pero no queda satisfecho con estos argumentos, ha de disipar cualquier temor a un cuerpo pesado que pudiese caer sobre la superficie de la Tierra, y lo hace mediante argumentos provinientes de la física. «La Luna tiene en su movimiento y el giro de su revolución su seguro contra la caída, del mismo modo que los objetos colocados en una onda ven impedida su caída por la rotación circular; porque todo prosigue el movimiento que le es natural si nada lo desvía de él. Así, la Luna no es arrastrada hacia abajo por su peso porque su tendencia natural se ve frustrada por su revolución. Al contrario, habría quizá más razón para sorprenderse si estuviera a un tiempo

inmóvil y en reposo, como la Tierra» [258]. En éste tenemos otro pasaje que anticipa el siglo XVII. El movimiento de la Luna es la suma de dos componentes; si parase de rotar, comenzaría a caer hacia la Tierra por la gravedad. La elección de la analogía de la piedra en la onda como analogía del movimiento de la Luna muestra una conciencia de la unidad de los fenómenos físicos. La afirmación acerca de la continuidad del movimiento de un cuerpo en tanto nada lo desvía es, de hecho, la formulación de la ley de la inercia proporcionada por Galileo y Newton más de quinientos años después.

Debemos, por supuesto, estar precavidos ante las generalizaciones precipitadas cuando nos tropezamos con pasajes como el que se acaba de citar. En el Mundo Antiguo, intuiciones de este tipo las hubo pocas y esparcidas y no podrían, en ausencia de una investigación sistemática sobre bases teóricas y prácticamente profundas, combinarse en un único sistema homogéneo. No obstante, la tendencia general es suficientemente nítida; las esquemáticas categorías de Aristóteles fueron comenzando a desintegrarse conforme el enfoque de los fenómenos físicos se fue haciendo más flexible y menos coaccionado por las concepciones aceptadas. Las ataduras no habían sido, sin embargo, completamente rotas, como vemos en el intento de explicar la conjetura sobre la naturaleza terrestre de la Luna dentro del marco de la terminología aristotélica del lugar natural, el «arriba» y el «abajo». El movimiento de la Luna en el firmamento, lejos de probar que es de naturaleza diferente de la de la Tierra, apunta a la conclusión de que hay cuerpos del mismo tipo que ésta que no están en sus lugares naturales. Así es como argumenta Plutarco y apoya su opinión en el paralelismo con otro de los elementos, el fuego. El fuego acallado en las bóvedas de la Tierra, bajo los volcanes, es también fuego, aunque esté fuera de su lugar natural. Igualmente el aire confinado en un fuelle es un elemento «ligero» con una tendencia hacia arriba, pero que es forzado a fluir hacia cualquier sitio que no es su lugar natural.

Para hacer aún más fuerte su posición, Plutarco vuelve atrás el camino hasta llegar a la gran autoridad de Empédocles y esa apelación no es sólo típica del espíritu ecléctico de la época de Plutarco, sino que demuestra la cercanía de su punto de vista intelectual al enfoque científico de los grandes filósofos presocráticos. Plutarco mantiene que debemos estar en guardia ante interpretaciones demasiado literales de la expresión «lugar natural». «Ten cuidado, amigo,

de no desplazar todo a su lugar natural, porque eso es insistir en la desintegración del cosmos al introducir en la materia el «conflicto» empedocliano» [262]. Esta separación absoluta de categorías diferentes en compartimentos estancos crearía —en palabras de Platón— un mundo sin Dios, algo así como un cuerpo sin alma ni mente. El mundo no puede existir sin esa antítesis que Empédocles llamaba Amor «que genera cambio de lugar y la transferencia de cualidades de un cuerpo a otro, que impone la necesidad de movimiento a uno y la del reposo a otro, que fuerza a un cuerpo a moverse de su lugar natural hacia otro mejor, creando así la armonía del universo».

Esa crítica del lugar natural lógicamente conduce a un examen crítico del concepto de «movimiento natural», lo que implica la negación de una de las distinciones fundamentales de la física aristotélica. A fin de explicar el movimiento circular eterno de los cuerpos celestes por oposición a los movimientos de los cuerpos pesados y ligeros, Aristóteles postulaba que estaban compuestos por un quinto elemento, el éter. Plutarco retorna a la terminología de Anaxágoras la cual identifica fuego y éter y tras descartar la idea aristotélica básica de asignar un estatus especial a las estrellas, Plutarco cuestiona la validez del movimiento natural: «Si todos los cuerpos estuvieran constreñidos por sus movimientos naturales, entonces el Sol no se movería en un círculo, ni lo haría Venus, ni ninguna de las demás estrellas, pues, por su naturaleza, los cuerpos ligeros e ígneos deberían moverse hacia arriba y no en círculo. Pero si la naturaleza permite tales diferencias en los cambios de lugar (que en la Tierra el fuego sea transportado hacia arriba, mientras que al alcanzar el firmamento rote en un círculo), no es sorprendente que los cuerpos pesados terrosos, al alcanzar el cielo, hubiesen de ser también compelidos a cambiar su forma de movimiento» [263].

Plutarco llega finalmente a una conclusión que vuelve nula y vacía a toda la dinámica aristotélica. «Si abandonásemos las teorías a las que el hábito nos ha esclavizado y decimos sin temor lo que pensamos, entonces resultaría que ninguna parte del universo tiene un orden o posición o movimiento peculiar que pueda ser categóricamente llamado natural. En vez de esto, debemos decir que si todo se mueve de manera apropiada a aquello en virtud de lo cual existe y para lo que fue creado, y si se mueve y actúa y es afectado en concordancia con la preservación o belleza o poder de eso otro, entonces ésto es lo que se entiende por lugar natural, movimiento na-

tural y condición natural» [264]. En otras palabras, no existe una antítesis como la de movimiento natural y violento, ya que el movimiento de todo cuerpo es natural en el contexto de las circunstancias especiales en las que tiene lugar, o las que sitúan al cuerpo en la condición y lugar dados. Con estas palabras Plutarco destruye los cimientos de la física aristotélica, pero en su lugar no erigió ningún otro sistema físico que hiciera posible analizar esas circunstancias específicas y mostrar cómo las diversas formas de movimiento resultan de ellas y «conforme a ellas». No era suficiente, en un destello de genio intuitivo, dar en el clavo con varios detalles de la ley newtoniana de la gravedad o hacer alusión a la ley de la inercia, como sucede en el pasaje anteriormente citado. Llegados a este punto, lo que se necesitaba era la construcción de un nuevo sistema analítico que condujera la crítica más allá del *cul-de-sac* de las generalidades hacia el camino estrellado de la ciencia experimental. Pero en su lugar encontramos alegoría; Plutarco, en la línea de Platón, compara el cosmos con una criatura viviente. Del mismo modo que los miembros humanos no están dispuestos conforme a principios naturales, en sentido aristotélico, las partes del cosmos lo están como corresponde a las leyes y exigencias de un organismo vivo. En el capítulo 15 cada uno de los cuerpos celestes es comparado con un miembro del cuerpo humano: el Sol, con el corazón del universo (siguiendo a Posidonio), bombeando calor y luz como si fueran sangre; la Luna, con el hígado, situado entre el corazón y los intestinos. Al final del capítulo una vez más se subraya que los cuerpos no están equilibrados según su peso, sino siguiendo otro principio de disposición. La idea estoica de que el universo es un organismo único y homogéneo es llevada al extremo de convertirla en una detallada analogía, al tiempo que el platónico que hay en Plutarco rechaza la norma —aceptada por los estoicos— de que los elementos pesados tienden hacia abajo mientras los ligeros se alzan hacia arriba. De mayor importancia que todos esos detalles es, sin embargo, la comparación efectiva del cosmos con un ser vivo, pues en ella encontramos un claro indicio de la *Weltanschauung* de los griegos. El tema es tan significativo que habremos de volver sobre él más adelante.

Vamos ahora a considerar aquellos capítulos de *De la cara de la Luna* que tratan de la naturaleza de la Luna tal como es mostrada ópticamente.

Los fundamentos de la óptica geométrica ya habían sido discutidos por Euclides en su obra sobre la luz (*c.* 300 a.C.). Herón de Alejandría publicó su libro sobre los espejos poco después de la época de Plutarco, pero parece ser que muchos de esos problemas eran ya conocidos desde varios siglos antes de Herón, en tiempos de Arquímedes, y quizá incluso antes.

Herón también considera la cuestión de las condiciones físicas de las superficies reflectantes; al hacer hincapié en la necesidad de pulimentar la superficie para obtener las mejores condiciones de reflexión, atribuye la reflexión defectuosa a la absorción de rayos de luz por parte de la superfice rugosa y no pulimentada. Las leyes de la reflexión, incluyendo la resultante de una serie de repetidas reflexiones procedentes de varias superficies (reflexiones de dos o más espejos), eran, por tanto, conocidas por los contemporáneos de Plutarco. Sin duda también entendieron las leyes de la refracción que serían después formuladas detalladamente por Ptolomeo en el siglo II d.C. Una gran parte de su libro se ha conservado en una traducción latina hecha en el siglo XII a partir de una versión árabe de la griega original. Ptolomeo no sólo emprende desde el punto de vista geométrico el examen detallado del fenómeno de la refracción, sino que además explica la refracción de la luz en la atmósfera por los cambios en la densidad del aire.

Es contra el trasfondo de este conocimiento óptico que le era contemporáneo, como debemos juzgar el uso que Plutarco hace de la evidencia óptica en apoyo de su argumento de que la Luna es térrea, frente a la opinión de Posidonio de que es una mezcla de aire y fuego. «No hay reflexión procedente de un cuerpo rarificado y fino. De modo similar, difícilmente puede suponerse que la luz vaya a ser reflejada por la luz, o el fuego por el fuego, porque el cuerpo reflectante ha de ser masivo y denso de modo que los rayos puedan golpearlo y ser así reflejados por él. El aire, por ejemplo, transmite los mismos rayos del Sol sin capturarlos o resistirse a ellos, mientras que los árboles, las piedras y tejidos, cuando se sitúan en la trayectoria de la luz, ocasionan su reflexión y dispersión en una gran medida. Vemos que también la Tierra es iluminada por el Sol, pues no deja pasar sus rayos hasta su fondo, como el agua, ni a través de toda su sustancia, como el aire, sino que así como un círculo cruza la Luna y corta una parte de ella, así también la superficie de la Tierra es cortada en dos de manera que una mitad está iluminada

mientras la otra permanece oscura... Permítaseme hablar geométricamente y en términos de proporción: si vemos que de tres cosas (Tierra, Luna y aire) que la luz del Sol golpea, la Luna es iluminada, no en el modo en que lo es el aire, sino en el mismo en que lo es la Tierra, necesariamente se sigue que esos dos objetos que son afectados por la misma cosa del mismo modo, deben ser de tipo similar» [267].

La opinión de Plutarco es confirmada ulteriormente por el hecho de que durante un eclipse solar la luz del Sol no penetre la Luna. Cierto es que Posidonio trató de armonizar esto con su propia teoría, pero Plutarco rechaza sus argumentos: «La afirmación de Posidonio de que la luz no llega hasta nosotros a través de la Luna debido a su profundidad, es obviamente errónea, pues el aire, que es ilimitado y tiene una profundidad varias veces mayor que la de la Luna, es iluminado por el Sol y por los rayos de éste que brillan sobre él. Nos sentimos, por tanto, inclinados hacia la opinión de Empédocles de que la iluminación que nos llega procedente de ella es causada por una cierta reflexión del Sol sobre la Luna. De ahí que no nos alcance calor o brillo algunos, como cabría esperar si hubiera habido una inflamación y mezcla de luces, sino que al igual que el eco devuelto cuando las voces se ven reflejadas es más débil que el sonido original, y la corriente levantada por los misiles al rebotar golpea con menor fuerza, «así el haz de luz, golpeando el amplio círculo de la Luna», nos envía un débil y vago chorro de luz porque su fuerza, debido a la reflexión, se ve disipada» [265].

La siguiente cuestión debatida es el modo en que la luz es reflejada por la Luna. En esos interesantes capítulos se nos muestra cómo los primeros conceptos de la óptica física comenzaron a desarrollarse por esa época a partir de la teoría geométrica de la luz. Los opositores a la teoría de la reflexión de la luz lunar partían de la premisa de que el único tipo de reflexión es la geométrica de los espejos; lo que les llevaba a un argumento doble: «...De acuerdo con la ley de que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, se sigue que, cuando la Luna está medio iluminada en el centro del firmamento, su luz no será transportada hasta la Tierra, sino que será desviada de ésta, pues el Sol estará entonces sobre el horizonte y sus rayos alcanzarán la Luna y serán reflejados desde ésta con el mismo ángulo. En ese caso, caerán más allá del otro extremo de la Tierra de modo que su luz no nos llegue. En cualquier otro

caso debería haber una gran desviación del ángulo (de reflexión), lo que es imposible...» El segundo de los argumentos es como sigue: «Basamos nuestra posición en la asunción de que cualquiera que esté en la trayectoria de los rayos reflejados no sólo verá el cuerpo iluminado, sino también el que ilumina... Puesto que esto ha sido probado en la teoría y en la práctica, aquellos que sostienen que la Tierra es iluminada por la luz reflejada por la Luna, deberían ser capaces de mostrarnos la imagen del Sol reflejada de noche en la Luna, del mismo modo que la vemos de día en el agua que refleja la luz solar. Puesto que esta imagen no puede verse, deberían concluir que la luz de la Luna no es producida por reflexión. Con lo que ésta no es de la misma naturaleza que la Tierra...»

Ambos puntos son respondidos postulando una reflexión *difusa* tanto en los sólidos como en los líquidos, lo que puede ser explicado mediante la reflexión geométrica si suponemos que la superficie reflectante está compuesta de muchos espejos diminutos de todo tipo y condición. «...Muchas de las partes de la Luna no son lisas, sino rugosas, lo que da lugar a que los rayos que nos llegan procedentes de un cuerpo tan grande y a tan gran altura hayan sido reflejados en equis desde todas partes, doblándose y emergiendo en un único brillo, como si nos llegaran procedentes de muchos espejos... Tampoco la leche forma una imagen como la de un espejo, ni refleja con fidelidad, pues sus partes son rugosas y no lisas. ¿Por qué entonces habría de ser la Luna capaz de reflejar una imagen como lo hacen los espejos pulimentados? Por otra parte, si hubiese un desconchón, o mancha, o rugosidad en el punto de reflexión de uno de esos espejos, la imagen, aunque visible, sería, no obstante, borrosa» [266, 269].

La discusión sobre la naturaleza de las manchas de la Luna es recurrente a lo largo de todo el libro. ¿Puede ser esto una ilusión óptica causada por la vaguedad de la luz lunar? Este planteamiento es refutado transfiriendo la cuestión de lo observado al observador. La gente corta de vista es la que no puede distinguir diferencia alguna de forma en el orbe lunar, viéndolo absolutamente liso. La irregularidad de la superficie lunar obviamente destierra la teoría de la ilusión óptica, pues en tal caso toda la superficie debiera aparecer borrosa. La conjetura estoica (que las manchas son bolsas de aire dentro del fuego lunar, o una capa de aire en dicho fuego) es contradicha por la localización permanente de las manchas, pues si sobre

la superficie de la Luna hubiese dispersas masas de aire, dejarían de sernos visibles cuando la Luna estuviese llena y el Sol lo alcanzase con todo su poder. Aquí Plutarco extrae un paralelismo de la Tierra: Del mismo modo que la luz del Sol penetra e ilumina todo el aire en la Tierra, excepto el que está en valles y nichos, que permanece opaco y no iluminado, podemos así suponer que las manchas opacas de la Luna son valles que la luz del Sol no alcanza. «Y con respecto a esa aparente cara que hay en ella, supongamos que, del mismo modo que en nuestra Tierra hay ciertas grandes depresiones, ella también está excavada por grandes simas y grietas que contienen agua o aire oscuro, a las cuales no toca la luz del Sol, ni las penetra, sino que se ve eclipsada allí de modo que la reflexión en esa dirección se dispersa» [268].

Finalmente, el tamaño de las manchas es estimado sobre la base de lo que se conocía acerca de las dimensiones lunares, y el argumento de que sombras tan enormes indican que los objetos que las producen son igualmente grandes, es refutado señalando que la longitud de las sombras depende también de la posición del Sol.

Después del debate científico y antes de los capítulos sobre mitología que ponen fin al libro, los participantes plantean la cuestión de si la Luna está habitada por animales o seres humanos. El mismo hecho de que se plantee tal cuestión y el modo en que se discute nos proporciona más datos para la comprensión de la transformación de los axiomas aristotélicos en conceptos relativos que se produjo en tiempo de Plutarco. El problema se plantea en conexión con el tema central de la discusión. Alguien mantiene que si la Luna estuviese habitada, la posición de los que niegan su naturaleza térrea se vería reforzada, especialmente si es planteada en términos ligeramente diferente: ¿Es apta la Luna para la habitación de seres vivos? ¿Podríamos argüir, en el supuesto de que está vacía y desolada, que fue creada en vano y sin propósito? Encontramos aquí un instructivo paralelismo con un libro escrito en tiempos modernos, el *Naturgeschichte und Theorie des Himmels* (1755) de Kant. El tercer capítulo de ese libro, titulado «De los habitantes de las estrellas», sigue una línea de pensamiento similar a la contenida en los capítulos 24 y 25 de *De la cara en el orbe de la Luna*. Tanto Plutarco como Kant mencionan las áreas desoladas de la Tierra como refutación del argumento de que una estrella deshabitada carece de valor. «Después de todo», dice Plutarco, «vemos que no toda la Tierra es fértil y está po-

blada; al contrario, sólo una pequeña parte de ella —los picos y penínsulas que emergen del mar— producen criaturas vivas y plantas, el resto está desolado y yermo debido a las tormentas invernales y la erosión, o porque están sumergidas en el océano, lo que ocurre con la mayoría de la Tierra» [270]. Plutarco prosigue haciendo una comparación en la línea de la doctrina estoica de la simpatía cósmica. Así como las regiones deshabitadas de la Tierra tienen una benéfica influencia sobre las partes habitadas (vapor procedente del mar, fundición de las nieves de los climas norteños, etc.), también podría ser que la Luna, aunque estuviese deshabitada, tuviera una influencia sobre nosotros mediante la radiación de la luz reflejada por ella, que está constituida por rayos de todas las demás estrellas y el Sol. Plutarco está aquí influenciado por la pasión cósmica de Posidonio. Kant, por su parte, con su conciencia de la infinitud del cosmos de Newton, señala cuánto más insignificante es un planeta respecto al todo de la creación, que un desierto o isla desierta en relación a la superficie de la Tierra.

Plutarco no descarta la posibilidad de qua la Luna esté habitada, del mismo modo que Kant presume que hay vida en los planetas, mas ambos llegan a la conclusión de que tales criaturas tendrán una estructura física diferente a la del hombre. Plutarco menciona la multiplicidad de formas adoptadas por las criaturas en nuestra Tierra y su adaptación a las distintas condiciones; del mismo modo podría suponerse que las criaturas están adaptadas en la Luna a las condiciones de vida de allí. Al final de la discusión, imagina a los habitantes de la Luna mirando hacia la Tierra y preguntándose cómo esa oscura y húmeda masa, llena de nubes y nieblas, puede producir y sustentar vida, concluyendo, quizá, que la Luna es la única Tierra.

Para completar la imagen del «clima científico» de la cultura helenística a comienzos de nuestra era, mencionaremos brevemente otro tema astrofísico que es discutido en las *Quaestiones Naturales* de Séneca (*c.* 3 a.C.-65 d.C.): la naturaleza de los cometas. La forma de los cometas y el modo en que hacen su aparición ha sido una fuente de desconcertante admiración para todas las generaciones. Aristóteles, en su *Meteorologica* los contempla como fenómenos meteorológicos que se forman en la región sublunar, entre la Tierra y la Luna. Dentro del marco de su propia interpretación del cosmos, sus argumentos resultan suficientemente razonables: los cometas carecen de la permanencia y constancia que constituyen los signos más

relevantes de la eternidad y divinidad de las demás estrellas; aparecen repentinamente en el firmamento, moviéndose a veces con gran velocidad, y desaparecen tras un breve lapso; su curso no cae dentro de los signos del zodíaco, a diferencia del de los otros planetas.

La opinión de Aristóteles fue aceptada por los astrónomos, quienes continuaron considerando a los cometas como fenómenos atmosféricos hasta finales del siglo XVI. Fue Tycho Brahe quien, en un ensayo escrito en 1588, probó por vez primera, mediante sus observaciones y mediciones, que el gran cometa de 1577 estaba más allá de la órbita de Venus. Pese a todo, Galileo todavía mantuvo la opinión aristotélica que sería finalmente descartada en la generación de Newton.

Séneca presenta la opinión de dos científicos, Epigenes y Apolonio de Mindos, de los cuales, el primero era un seguidor de Aristóteles, mientras el segundo —aparentemente un contemporáneo de Séneca— se oponía a aquél con una teoría que está próxima a la moderna. Séneca se siente inclinado a apoyar a Apolonio, como resulta claro en la introducción: «Para clarificar este problema debemos, en primer lugar, investigar si los cometas son de un género similar al de las estrellas superiores. Así, es verdad que ciertos rasgos son aparentemente comunes a ambos: sus salidas y puestas y también su forma, pues aunque la de los cometas es menos compacta y más larga, ambos consisten, sin embargo, en brillantes masas de fuego... A este fin es esencial recopilar información sobre los cometas desde los tiempos más antiguos, pues hasta el presente ha sido imposible determinar sus cursos debido a su rareza, o descubrir si se atienen a un ciclo fijo y si su aparición en un cierto momento es el resultado de una secuencia fija». Séneca prosigue describiendo la teoría de Epigenes de que los cometas están formados por un tipo de fuego que gira impetuosamente en lo alto en un tornado. Séneca objeta que, de ser así, los cometas sólo harían aparición durante las tormentas, cuando, de hecho, son vistos también cuando no hay viento alguno, y las fluctuaciones en su brillo no están en modo alguno relacionadas con cambios en la fuerza del viento; los vientos golpean grandes extensiones de aire, mientras un cometa aparece sólo en un lugar y a una altura que escapa al alcance de los vientos; finalmente, no hay ninguna semejanza de forma entre un tornado y un cometa.

A continuación, Séneca cita la conjetura de Apolonio de Mindos: «...Un cometa es una estrella independiente como el Sol y la Luna. Su forma no está comprimida en una bola, sino suelta y alargada; no tiene un curso definido, sino que atraviesa las regiones superiores del cosmos y se hace sólo visible cuando llega a la parte inferior de su curso... Los cometas son muchos y diversos, y distintos en tamaño y color: unos son rojos y apagados; la luz de algunos es brillante, clara y líquida; la llama de otros no es clara y suave, sino que va envuelta en humo chillón. Unos aterrorizan y hielan la sangre, amenazan con futuras sangrías. Su luz crece y se desvanece como la de otras estrellas que son brillantes cuando se ponen y grandes cuando están cerca de nosotros, decreciendo cuando ascienden a lo más alto y brillan aún más débilmente cuando se alejan más» [256]. En principio Séneca concuerda con esta opinión. El rechaza la idea de sus contemporáneos y colegas estoicos de que un cometa sea una llama repentina; está seguro de que es una de las creaciones eternas de la naturaleza, contrariamente a los fenómenos transitorios de la atmósfera. «¿Cómo puede algo persistir en el aire si el aire mismo no persiste en un estado durante mucho?». El fuego tiende hacia arriba, mientras el curso del cometa es curvo, como el de las otras estrellas. «Yo no sé si otros cometas siguen ese curso, pero dos de los de nuestro tiempo lo han hecho.» Al mismo tiempo, Séneca tiene dudas que matizan su aceptación de la opinión de Apolonio acerca de algunos puntos. Menciona el antiguo argumento de que los cometas no están confinados dentro de la región del zodíaco y tiene además otra objeción: «Una estrella nunca puede ser vista dentro de otra estrella, nuestro ojo no puede penetrarla y ver a su través las regiones superiores; pero a través de un cometa es posible discernir las porciones de firmamento de detrás, como a través de una nube. De ello se seguiría que un cometa no es una estrella, sino luz y fuego inestable.»

Para Séneca está claro que el tiempo todavía no ha dicho la última palabra sobre la naturaleza de los cometas: «¿Por qué habría de sorprendernos que un fenómeno cósmico tan raro como los cometas no puede ser encajado en el marco de las leyes regulares, que no podamos conocer su comienzo ni su final, puesto que sólo reaparece tras períodos de tiempo tan enormes?... Llegará un día en que el tiempo y las investigaciones de largas generaciones sacarán a la luz lo que ahora está oculto. Una sola generación no basta para re-

solver tan grandes problemas... Así, alguien llegará a explicar el curso de los cometas, por qué sus trayectorias son diferentes de las de los planetas, y cuáles son su tamaño y naturaleza. Contentémonos con lo que hemos descubierto hasta ahora, los que vengan detrás de nosotros añadirán también su grano de arena a la verdad» [257]. Es difícil imaginar un mayor contraste con los juicios apodícticos de Aristóteles que el de estas nobles palabras de Séneca. Ellas son, quizá, el último de los pocos chispazos de conciencia del progreso científico que encontramos en la antigüedad. Otras dos anteriores, con un intervalo de tiempo de doscientos años entre ellas, podrían mencionarse aquí.

La primera aparece en el segundo capítulo de *De la Medicina Antigua*, un tratado médico que data de por lo menos el 420 a.C. Reza como sigue: «El descubrimiento íntegro se hará, si el investigador es competente, conduce sus investigaciones con conocimiento de los descubrimientos que ya se han hecho, y hace de ello su punto de partida.» El otro pasaje se encuentra en *El Método* de Arquímedes. Antes de establecer su teorema sobre el volumen de un prisma y una pirámide, Arquímedes dice: «Estoy persuadido de que será de no poca utilidad para las matemáticas, pues intuyo que alguien, bien sea de entre mis contemporáneos o mis sucesores, será capaz, por medio del método —una vez establecido éste—, de descubrir otros teoremas en añadidura, que no se me han ocurrido a mí.»

Aunque la historia de las distintas ciencias se había constituido en un tema de estudio desde tiempos tan antiguos como el de Aristóteles y sus discípulos, no cabe duda de que sólo el gran período científico de los siglos tercero y cuarto a.C. produjo los primeros comienzos de un reconocimiento más permanente y extendido del progreso científico y su significado. Las palabras de Séneca reflejan con fidelidad el sentimiento de su generación, la cual, como nosotros hoy en día, vio la comprensión del cosmos como un proceso histórico, una tarea sin fin transmitida de generación en generación.

Capítulo X

LOS LIMITES DE LA CIENCIA GRIEGA

> «¿Has calculado las anchuras de la Tierra? Cuenta, si es que sabes, todo esto.»
>
> Job 38, 18

La imagen desplegada por una revisión general de la antigua ciencia griega es la característica del nacimiento y muerte de un organismo vivo. Somos testigos del período de germinación en los siglos sexto y quinto, con la aparición de la escuela milesia, el trabajo de Pitágoras y sus primeros discípulos, y las enseñanzas de Empédocles y Anaxágoras. Esta semilla dio su fruto en el período que va de Leucipo y Demócrito y la escuela pitagórica tardía en la segunda mitad del siglo quinto, a la muerte de Arquímedes a finales del siglo tercero. En el siglo segundo, después de Hiparco, el ritmo de creación se ralentiza perceptiblemente y comienza el largo declinar de la capacidad creativa. Su lugar es ocupado por la actividad de compiladores y comentaristas, empezando en los primeros siglos de la era cristiana y extendiéndose hasta el eclipse final de la cultura clásica. Todo el proceso abarca un período bastante dilatado: unos ochocientos años, si lo contamos de Tales a Ptolomeo, y más de mil si lo alargamos hasta los tiempos de los últimos comentaristas. En la presente revista del cosmos griego no se ha incluido el mundo de la vida orgánica. Pero aun cuando se incluyese a la biología, no habría dudas de que la principal contribución de los griegos a la herencia humana tuvo lugar en la esfera de la astronomía y las matemáticas, especialmente la geometría. En las demás ciencias físicas no hay logros proporcionales al vigor de la primera explosión de la actividad científica y al tiempo

que duró esa actividad. Son en verdad muy pocas las leyes cuantitativas que se formularon en todas las ramas de la física «terrestre»: si se mencionan las leyes de la armonía musical de Pitágoras, las leyes de la palanca de Arquímedes, y alguna de las leyes de geometría óptica de Herón, las habremos mencionado prácticamente todas. De manera parecida, se hicieron pocos progresos en dinámica. Aun no deseando menospreciar los logros de Aristóteles en esta esfera, debemos recordar que el conjunto de su doctrina es sólo parcialmente cuantitativa y tras él, el único nombre que puede mencionarse es el de Herón, quien formuló las leyes del paralelogramo de las velocidades. El importante trabajo de Arquímedes en hidrostática y sobre el centro de gravedad es de naturaleza estático, lo mismo que su ley de la palanca. Hombro con hombro con la ausencia de formulaciones cuantitativas, choca la carencia de instrumentos de medida precisos, y el lento desarrollo de máquinas simples. Esto nos lleva a uno de los fenómenos más extraños e intrigantes de la historia —la ausencia de tecnología en la Antigua Grecia. En el mundo moderno hemos crecido tan acostumbrados a ver la ciencia y el progreso tecnológico como inseparables, que no podemos entender cómo la nación que mediante el descubrimiento del método científico pavimentó la ruta de la ciencia moderna, no consiguió desarrollar ni siquiera una iniciativa en la esfera técnica. Puede decirse que el lento progreso alcanzado por la ciencia griega —excepción hecha de la astronomía— contradice completamente la grandeza de su visión e ímpetu original, y que sus pocas contribuciones técnicas están muy lejos de sus logros científicos.

No podemos discutir estas cuestiones sin hacer referencia a la sociología y psicología, y, finalmente, sin entrar en consideraciones históricas que caen más en el campo de una historia amplia de la cultura que en el más reducido de la historia de la ciencia. Pese a que en fechas recientes un cierto número de valiosos trabajos de investigación han ayudado a clarificar la cuestión, difícilmente podríamos considerarla resuelta o proporcionar una respuesta completamente satisfactoria. En el curso de esta investigación es de suma ayuda el comparar el período griego con el nuestro, incluso en temas singulares. Comenzaremos por ellos.

Uno de los factores que retardaron el progreso de la ciencia griega fue indudablemente el aislamiento del hombre de ciencia que de vez en cuando quebró la cadena de la evolución, aislamiento que

también parece haber sido un hecho a comienzos del período moderno; sólo un pequeñísimo puñado de hombres mostraron un inteligente interés por la obra de Copérnico y le prestaron apoyo. Algo muy semejante ocurrió con Tycho Brahe y Kepler y, sin embargo, hay una diferencia fundamental: los científicos modernos se vieron favorecidos por la existencia de universidades y el clima general del conocimiento en Europa. Ambos, junto con la difusión de la imprenta, conduciría al inicio de la organización de la ciencia hacia mediados del siglo diecisiete, con la fundación de las primeras academias en Italia, Francia e Inglaterra. Podría uno preguntarse si la Academia de Platón y las demás escuelas filosóficas no cumplieron una función similar en la antigüedad, pero aunque es cierto que esas instituciones también prestaron atención a las ciencias naturales y a las matemáticas, fueron estudiadas como parte de la doctrina específica de cada escuela filosófica y tuvieron una importancia secundaria dentro de la enseñanza filosófica efectiva. No hubo, por tanto, una atmósfera uniforme en que pudiera florecer una tradición constante de progreso científico. Esto nos conduce a otro aspecto que debe ser tenido en consideración. La ciencia griega, al igual que la moderna, tienen su origen en un distanciamiento revolucionario de sus predecesores: La escuela milesia opuso el logos al mitos, mientras Galileo y los investigadores del siglo diecisiete liberaron la ciencia del encorsetamiento de la Iglesia e hicieron de ella una esfera de pensamiento independiente. La diferencia fundamental entre ambos procesos históricos radica en que, mientras el primero *ató* la ciencia a la filosofía, el último desató los lazos que las mantenían juntas. Cuando la ciencia moderna volvió la espalda a la filosofía escolástica y a la filosofía de Aristóteles, simultáneamente la volvió a toda filosofía. Galileo y sus discípulos, la Royal Society de Londres, Newton y Huyghens en Holanda, todos los fundadores de la ciencia del diecisiete, fueron investigadores de la naturaleza, no filósofos. Tras Descartes y Leibniz no hubo ya filósofos que contribuyeran con algo de importancia a las ciencias exactas. Ese fue el desvío de los caminos. Hoy el ocasional contacto entre filósofos y científicos adquiere la forma de la discusión epistemológica restringida al significado de los logros de la ciencia y no afecta a sus métodos.

Por el contrario, en la antigüedad fue la filosofía griega la que produjo la transición de la mitología al pensamiento racional. Cierto es que al principio el problema central para esta filosofía fue el ex-

plicar los fenómenos naturales mediante causas racionales, pero ese objetivo rápidamente se fusionó con el impulso más amplio hacia la investigación sistemática de las distintas formas de conocimiento, la naturaleza fundamental de la realidad y el lugar del hombre en el mundo. Ese es el camino por el que se convirtieron en centros de investigación científica las escuelas filosóficas. Sólo después de Aristóteles, en el período helenístico, surgieron científicos profesionales en el sentido moderno, grandes investigadores, matemáticos y astrónomos tales como Euclides y Arquímedes, Aristarco y Apolonio de Pérgamo, Eratóstenes e Hiparco. Pero aún así, la ciencia griega se vio todavía ensombrecida por la filosofía, y ello por dos razones: en primer lugar, por la tremenda influencia educativa de Platón, quien fuera la inspiración de la investigación astronómica y matemática; y en segundo lugar, como resultado de la sistematización enciclopédica de Aristóteles y la gran influencia de la escuela estoica en los siglos sucesivos.

Puesto que la cuestión central en filosofía es «¿Por qué?» y el «¿Cómo?» está subordinado a ella, esa larga asociación de la filosofía con las ciencias naturales fue perjudicial para el progreso de estas últimas. La lógica y la deducción fueron más importantes que la inducción y la experiencia, y la visión teleológica de la naturaleza impidió el incremento del conocimiento físico. La historia de la ciencia moderna nos ha enseñado cuán importante para la comprensión de la naturaleza puede ser la selección adecuada de los, a veces, aparentemente insignificantes fenómenos, de entre la masa enorme de los existentes, así como la incesante observación de sus menores detalles. Dos conocidos ejemplos de ello en el siglo diecisiete son el descubrimiento galileano de las leyes que gobiernan la caída de los cuerpos y la explicación newtoniana de la descomposición espectral de la luz. El enfoque filosófico no favorece ese tipo de razonamiento de lo particular a lo general: los problemas fundamentales de la filosofía son esencialmente generales y construye sus sistemas por integración antes que por diferenciación. He aquí la paradoja: la filosofía realizó la tarea histórica de proporcionar una actitud científica al estudio de la naturaleza, pero al mismo tiempo, fue uno de los factores que dificultaron un desarrollo ventajoso de dicho estudio.

Ahora debemos considerar influencias más ponderables. El problema de los logros técnicos griegos —o más bien de la ausencia de tales logros— ha recibido mucha atención y se ha propuesto todo

tipo de explicaciones. En comparación con los pueblos del Este, especialmente Egipto, no podemos hallar durante el período griego ningún progreso tecnológico digno de hacerse notar. Los egipcios desarrollaron, a lo largo de miles de años, sistemas de construcción con piedra a una escala nunca igualada; al mismo tiempo perfeccionaron los métodos de resolución de los problemas incidentales implicados en ese trabajo, como la extracción de las canteras, el transporte y la elevación de enormes piedras, la erección de pilares y gigantescos obeliscos cuyos detalles han tenido en jaque las mentes de ingenieros e historiadores en los últimos siglos. Esos magníficos métodos ensombrecen completamente los logros griegos en la construcción, e incluso los de los romanos después. Las exigencias de la edificación condujeron a la invención de máquinas basadas en los principios fundamentales de la mecánica (la palanca, el plano inclinado y otros útiles destinados a reducir el esfuerzo en función de la distancia atravesada.

De entre todas las consecuciones de los egipcios, podríamos mencionar su técnica minera que les permitió la explotación a grandes profundidades, y sus nuevos métodos en metalurgia. La esclavitud no dificultó esos desarrollos técnicos, antes bien, la cuestión de cómo emplear mejor grandes masas de hombres en grandes empresas técnicas, planteó nuevos problemas técnicos y organizativos que fueron resueltos con sumo éxito por los egipcios, como podemos comprobar tanto por los resultados como por las diversas descripciones proporcionadas por los organizadores mismos. Ese progreso técnico refuta la idea de que la existencia de la esclavitud en la antigua Grecia fue la razón decisiva de la ausencia de desarrollo tecnológico. Los críticos de esa idea han subrayado correctamente que está basada en una estimación exagerada del papel económico de la posesión de esclavos, al tiempo que conceden que hay aquí un factor psicológico en juego: el desprecio hacia los esclavos implicaba también el desprecio hacia lo que los esclavos hacían, a saber, el trabajo manual. La mentalidad griega era, básicamente, *aristocrática*. Al juzgar el trabajo manual de acuerdo con el estatus social del esclavo que lo realizaba, el griego llegó a desecharlo como impropio del destino espiritual del hombre. Platón dice: «¿Por qué es desacreditado el laborioso trabajo mecánico como denigrante? ¿Acaso no es simplemente porque lo más elevado de la naturaleza del hombre es tan débil por naturaleza que no puede controlar las partes animales?» [129]. Y

Aristóteles dice en su *Metafísica*: «Así pues, también pensamos que los maestros de cada arte son más honorables, conocen en un sentido más verdadero y son más sabios que los trabajadores manuales porque conocen las causas de las cosas que son hechas, mientras pensamos de éstos que son como algunos objetos inanimados que actúan de hecho, pero sin saber lo que hacen (mas así como los objetos inanimados desempeñan sus funciones por una tendencia natural, los trabajadores lo hacen por hábito)» [167]. Hábito es la irreflexiva adquisición de experiencia. Por tanto, el artista o capataz que es capaz de impartir sus conocimientos a otros es superior a los trabajadores.

Continuando con el mismo pasaje podemos ver la conexión entre el desprecio griego hacia el trabajo manual y su rechazo de la aplicación práctica de la ciencia. La admiración mostrada hacia los buenos artistas —sostiene Aristóteles— no se debe a su invención de algo útil, sino a su saber y talento únicos. «Pero conforme fueron inventadas más artes y unas se orientaron hacia las necesidades de la vida, otras hacia la recreación, los inventores de las últimas fueron siempre naturalmente considerados más sabios que los inventores de las primeras, porque sus ramas del conocimiento no se dirigen a la utilidad» [167]. La filosofía de la historia de Aristóteles muestra también esa mentalidad aristocrática: «De ahí que una vez que todas esas invenciones hubieran sido establecidas, las ciencias, que no aspiran a proporcionar placer o a las necesidades de la vida, fuesen inventadas, y lo fueran en primer lugar en aquellos lugares en que los hombres comenzaran antes a disponer de ocio. Esta es la razón por la que las artes matemáticas fueron fundadas en Egipto, porque allí la casta sacerdotal consiguió estar ociosa» [167].

El proceso de pensamiento es suficientemente claro. El trabajo sin estudio carece de valor, mientras que el estudio por sí mismo es el más elevado de los niveles de la actividad espiritual, superior a la combinación de estudio con cualquier propósito práctico. El valor de la ciencia se reduce cuando se convierte en un medio para un fin. La comparación que Aristóteles hace entre los diversos tipos de ciencia y el estatus social de un hombre, es de lo más instructivo: «Pero del mismo modo que, decimos, un hombre es libre cuando vive para sí y no en beneficio de otro, así nosotros nos entregamos a ésta como la única ciencia libre, pues sólo ella existe para sí misma» [168].

Por añadidura a todas las explicaciones ya dadas de esa preferencia de la ciencia teórica a la práctica —es decir, a las ciencias ex-

perimental y técnica—, hay otra importante razón derivada del carácter del antiguo griego: no veía ninguna necesidad de aplicar mejora alguna a los logros técnicos que le eran conocidos. Una vez más, Aristóteles nos revela esta psicología en su filosofía de la historia, como aparece plasmada en el pasaje del libro primero de la *Metafísica* anteriormente citado. «Que no es una ciencia productiva resulta claro incluso en la historia de los más antiguos filósofos, pues el que los hombres comiencen ahora, y comenzaran en un principio, a filosofar es debido a su admiración; inicialmente se admiraban ante dificultades obvias, después, avanzando paso a paso, establecieron cuestiones sobre las más grandes cosas, por ejemplo, sobre los fenómenos de la Luna, y los del Sol y las estrellas, y sobre la génesis del universo. Y un hombre que se siente confundido y se admira, se reconoce ignorante... por consiguiente, si filosofaron para librarse de la ignorancia, evidentemente se consagaron a la ciencia para saber, y no con fines utilitarios. Y esto es algo confirmado por los hechos; porque fue cuando casi todas las necesidades de la vida, el bienestar y los placeres estaban asegurados, cuando este tipo de conocimiento empezó a ser buscado» [168]. Compendiada en estas pocas afirmaciones se encierra la mentalidad del antiguo griego con respecto a los valores relativos de los bienes básicos. En primer lugar está el saber por sí mismo, la investigación orientada por el conocimiento, no por la mejora de las condiciones de vida. De hecho, en opinión de Aristóteles, nada más puede conseguirse en esa línea: el progreso técnico ha alcanzado ya el nivel en que puede satisfacer las necesidades esenciales de la vida y una de sus consecuencias más importantes es la ciencia pura y la filosofía. Las mejoras técnicas, si son en absoluto necesarias, carecen de valor en comparación con la capacidad humana de admiración, que impulsa al hombre a desvelar el secreto del cosmos. La posesión más inapreciable del hombre es su pura curiosidad intelectual. Por tanto, el valor de un descubrimiento no queda en modo alguno realzado por sus posibilidades prácticas y técnicas. El mundo tal y como ha sido creado y el lugar que el hombre ha encontrado para sí en él le proporcionan todo lo que requiere materialmente para su vida espiritual y para el mantenimiento de sus valores trascendentales.

Otra actitud griega más básica ante la vida dio un ímpetu adicional a esta línea de pensamiento: la insistencia en la moderación, especialmente en las exigencias materiales. Cualquier cosa más allá de

la «pura necesidad» era considerada un lujo desproporcionado con respecto al esfuerzo dedicado a conseguirla. Es un error pensar que esta actitud era un monopolio de la filosofía platónica que fue desterrado por Aristóteles. Incluso un filósofo como Demócrito, cuya concepción total del cosmos es tan distinta de la de Aristóteles como es posible, insistió en la necesidad de restringir la inclinación del hombre a dedicar demasiado de su limitada capacidad a mejorar sus condiciones materiales. «Uno tiene que caer en la cuenta de que la vida humana es débil y breve y está mezclada con muchas inquietudes y dificultades, con sólo preocuparse por posesiones moderadas, y de que las penalidades pueden medirse con la escala de las necesidades que uno tenga» [91].

Tan tempranamente como en el período mitológico, quedó una profunda huella en la mente griega, dejada por su conocimiento de los límites impuestos al poder del hombre frente a fuerzas más allá de su control, y por su temor de la venganza que tomarían esas fuerzas si se transgredían esos límites. Tal presunción por parte del hombre bien podía despertar la cólera de los dioses. «Hay que apagar la arrogancia (hybris) antes que un incendio» [38], dice Heráclito. Las leyes humanas, al tener como objeto el mantenimiento de la mesura apropiada en las relaciones de un hombre con sus conciudadanos, castigan los actos presuntuosos en contra de la sociedad en la que vive. Exactamente de la misma manera, los poderes cósmicos están constantemente en guardia para que ningún ser humano los transgreda. La ciencia racionalizó las fuerzas mitológicas y las convirtió en leyes de la naturaleza. Pero esto no alteró el sentimiento fundamental de los griegos de estar a merced de esas fuerzas ni su horror ante cualquier intromisión en su esfera, especialmente en tanto el efecto de la racionalización no fue ni profundo ni duradero. Hemos de recordar que en el curso del período helenístico, las tendencias irracionales recuperaron su ascendiente como consecuencia de la penetración de la cultura oriental en Grecia y Roma. A partir del siglo segundo a.C. se produjo una gran propagación de la astrología, que se originó en Balibonia y Egipto. Ayudada por su inclusión en las enseñanzas de la escuela estoica, arraigó en todos los círculos de la sociedad de Grecia y Roma, sin excluir los ilustrados. La medicina y la alquimia fueron contaminadas por la magia y otras doctrinas irracionales sobre misteriosas virtudes en el mundo animal, la vegetación y la materia inorgánica, fueron ampliamente difundidas. Todas estas

tendencias tuvieron como efecto el reforzamiento de las inhibiciones ante las empresas técnicas y la mera aplicación práctica de la ciencia.

El sentimiento general de inseguridad resultante de las circunstancias políticas también contribuyó a retraer, en vez de estimular, las invenciones técnicas. Pruebas de esto pueden encontrarse en las técnicas militares desarrolladas en los siglos tercero y segundo por Arquímedes, Ctesibio, Filón y Herón, quienes usaron la elasticidad de cuerdas tensas y del aire comprimido para la construcción de máquinas bélicas. Estas técnicas, hijas de la urgente necesidad, podrían haberse convertido en el núcleo de desarrollos tecnológicos considerables y variados, especialmente por cuanto el progreso hecho en matemáticas por Arquímedes y sus sucesores había puesto los fundamentos teóricos para ello. Pero, de hecho, no hay ningún signo de un desarrollo de este tipo que bien podría haber cambiado las estructuras económicas de la sociedad antigua, o por lo menos haber dejado su impronta en una parte de su vida económica. De los inventos de ese período sólo el reloj de agua y el órgano de agua de Ctesibo merecen una mención: todos los demás fueron meras piezas de exhibición, como el sifón de Herón o sus instrumentos para demostrar la fuerza motriz del vapor. En todas estas invenciones técnicas, incluso cuando fueran acompañadas de la construcción de mecanismos más pesados, había algo de juego o pasatiempo. Eran de hecho juguetes más que medios para domesticar las fuerzas de la naturaleza para su explotación técnica. Aunque existían todas las precondiciones necesarias, nunca se explotó la fuerza del vapor a escala técnica ni se dio a los elementos un uso económico con la construcción de molinos de viento o de molinos de agua, salvo del tipo más primitivo.

Los antiguos griegos creían fundamentalmente que el mundo tenía que ser *entendido*, pero que no había ninguna necesidad de *cambiarlo*. Esta siguió siendo la creencia de las generaciones siguientes hasta el Renacimiento. Esta actitud pasiva hacia el uso práctico de las ciencias naturales fue reforzada por la completa osificación de las ciencias naturales en la Edad Media en el estado en el que Aristóteles las había dejado. Los indicios de una actitud diferente que aparecen aquí y allá no son sino chispazos perdidos en la oscuridad de siglos. Se hizo un uso más económico y más variado de los ríos y los saltos de agua como fuerza motriz para los molinos; los molinos de viento comenzaron a construirse en el siglo doce; la invención de la pólvora tam-

bién impulsó los desarrollos técnicos. Pero la verdadera revolución, que con la primera explosión de sus fuerzas reprimidas transformó completamente los asuntos humanos, llegó con el cambio de actitud del hombre hacia la naturaleza anunciado por el Renacimiento. El Renacimiento fue el despertar del deseo de conquista del hombre, de conquista y control de la naturaleza a través de la ciencia. Previamente la actitud hacia la naturaleza había sido de sumisión y el carácter de la ciencia había sido teórico y especulativo. Ahora todo eso sucumbió ante el ansia de conocimiento como medio de controlar las fuerzas de la naturaleza y someterlas a las exigencias del hombre. Esta búsqueda del poder a través del conocimiento es una de las características señeras del Renacimiento: entendiendo la naturaleza, el hombre libre sería capaz de domesticarla y explotarla para extender su propio poder. Esta revolución, que tuvo lugar durante un largo período de tiempo, no puede retrotraerse a una única causa. Pero el significado de sus consecuencias es bastante claro: el temor a los dioses y los elementos fue reemplazado por un espíritu de conquista aventurera que convirtió a la ciencia en auxiliar del progreso técnico. La expresión suprema de esta transformación de los valores se encuentra en la personalidad de Leonardo da Vinci, el diseñador de puertos y canales, el soñador de máquinas que harían omnipotente al hombre, el visionario técnico que, entre otras cosas, concibió la idea del submarino y la del aeroplano. Esta actitud activa, agresiva, del hombre hacia la naturaleza y su deseo de intervenir en los procesos naturales le abrió un nuevo mundo, mientras la estructura crecientemente compleja de la sociedad encauzó su deseo hacia el descubrimiento científico y la invención técnica.

Sin embargo, todo esto sigue siendo insuficiente para explicar la peculiar cualidad de la ciencia griega y su lento ritmo de progreso. Hemos de volver atrás y examinar sus métodos reales de adquisición de conocimiento a la luz de los nuestros. Hablando funcionalmente, no hay ninguna diferencia: entonces, como ahora, la tarea de la ciencia era sistematizar la suma total de nuestro conocimiento empírico de modo que fuera posible predecir eventos futuros. Hemos visto cómo la ciencia antigua ejecutó esta tarea a la perfección en la astronomía. El material empírico acumulado a partir de observaciones realizadas durante siglos fue organizado en un sistema deductivo. Ante todo, se hicieron algunas generalizaciones que permitieron, por ejemplo, establecer una conexión entre los ciclos de los planetas y

sus distancias desde la Tierra —la Luna, con sus rápidas revoluciones, es el más próximo, mientras Saturno, con sus lentas revoluciones, es el más alejado. A continuación vienen las conjeturas que dieron uniformidad a todos los variados datos. Se desarrolló la hipótesis de las esferas, y después de ella la hipótesis de los epiciclos. Estas suministraron a los astrónomos modelos geométricos que explicaban los fenómenos conocidos por medio de un único principio: todas las revoluciones fueron reducidas a movimientos circulares. Si los griegos hubieran descubierto un nuevo planeta (el siguiente planeta, Urano, no fue descubierto hasta 1781 por Herschel), hubieran podido acomodarlo de inmediato en el marco existente y determinar sus movimientos por el método establecido. Cuando la siempre creciente precisión de la observación llevó al descubrimiento de la precesión de los equinoccios por Hiparco, éste también fue añadido a la familia de los movimientos rotatorios. Cuando un incremento ulterior de la precisión mostró que algunos cuerpos divergen de una órbita simétrica, el principio de círculos fue lógicamente extendido por la conjetura de los círculos excéntricos. Aquí tenemos ejemplos de la interacción de inducción y deducción que también ocasionó la mejora del calendario e hizo posible predecir los eclipses solares y lunares con más precisión. Así, el método científico logró, ya en los tiempos clásicos y sin otros medios que analogías geométricas y cinéticas, realizar plenamente en la astronomía la tarea funcional de la ciencia —la de capacitar al hombre *para predecir el futuro* con la máxima seguridad posible. Si comparamos la madurez científica de la astronomía griega con la debilidad de los logros griegos en física «terrestre», no podemos sino preguntarnos por las razones de este enorme contraste. La respuesta hay que buscarla principalmente en la gran simplicidad de la astronomía cuando se la compara con los fenómenos físicos que nos rodean. Por lo que hace a las condiciones experimentales, los datos astronómicos son, después de todo, absolutamente ideales. Los objetos de los experimentos son puntos (o discos) de luz cuyos movimientos son relativamente simples; el marco de las constelaciones fijas permite trazar con una precisión muy aceptable las posiciones y cambios de posición, incluso con un aparato observacional primitivo; y, en último lugar, pero no menos importante, la periodicidad de los movimientos hace posible repetir las observaciones sin límite después de que haya pasado un cierto tiempo. He aquí un caso en el que la naturaleza da al hombre todas las

ventajas de la investigación de laboratorio, excepto la posibilidad de cambiar arbitrariamente las condiciones. Aunque pueda parecer paradójico, el secreto de la simplicidad de la astronomía hay que buscarlo en la simplicidad propia del laboratorio, de las condiciones bajo la que es estudiada. Estas condiciones no tienen paralelo en los fenómenos naturales de la tierra. Aquí el verdadero progreso sólo empezó cuando el hombre comenzó a reproducir, casi inconscientemente, las condiciones ventajosas de la observación celeste en los experimentos de laboratorio.

La experimentación sistemática en el laboratorio se realizó por primera vez en el siglo XVII. Fue, en todos los sentidos, desconocida para los griegos. Así, el enigma del atraso en la antigüedad de la física terrestre en comparación con la astronomía se resuelve en el problema de por qué casi no se hizo ningún uso de los experimentos de laboratorio en la ciencia griega. La principal característica de un experimento es su *artificialidad*, que lo distingue de la observación de un proceso en su forma natural. En el dominio de la física terrestre la observación es sólo el estado más bajo del método experimental. Es verdad que no hay que despreciarlo, puesto que en muchos casos constituye el punto de partida para la ulterior investigación experimental. Pero un experimento puede resultar también de consideraciones teóricas vía contrastación de una hipótesis dada, sin que haya ninguna conexión directa con alguna observación empírica. Lo esencial en un experimento es el aislamiento de un cierto fenómeno en su forma pura, con vistas a estudiarlo sistemáticamente. Aquí reside su artificialidad. Los fenómenos naturales ocurren como parte de una red de procesos entretejidos e interconectados; su continuidad en el tiempo y en el espacio les hace aparecer ante nosotros como una única unidad completa. Aislar un fenómeno particular de esta unidad es como una operación en un cuerpo vivo que separe un miembro de los demás, o que lo coloque en una posición que permita observar su funcionamiento con tan pocas interferencias de las demás partes como sea posible. Aquí el ejemplo clásico lo proporcionan todos los experimentos mecánicos en los que la fricción o la resistencia al entorno se reduce tanto como se puede, de manera que puedan estudiarse los detalles del proceso mecánico puro. Fue sobre experimentos semejantes sobre los que se erigieron en el siglo XVII las mecánicas de Galileo y Newton. Estaban basados en la noción de que la fricción o la resistencia del entorno tienen que ser consideradas como

interferencias incidentales en el estudio de los fenómenos que ilustran una ley o principio natural en su forma pura. Esta concepción es totalmente distinta de la de Aristóteles. Para él el entorno era en realidad parte integral del fenómeno mismo, y consideraba insostenible la idea misma del aislamiento. Esto es particularmente importante, puesto que la era de la experimentación y la revolución general en las ciencias físicas comenzó con el estudio de problemas mecánicos. Aunque no es sensato ver una necesidad lógica en los desarrollos históricos particulares, la posición especial ocupada por la mecánica entre las demás ramas de la física y de la ciencia natural tiene que ser subrayada, puesto que fue esta posición especial la que la convirtió en el punto de partida de la ciencia moderna. La mayor parte de los fenómenos en el entorno del hombre, en la región «antropocéntrica», son de naturaleza mecánica y se derivan de fuerzas mecánicas, como la gravedad y la elasticidad. La acción de nuestras manos también se produce por contacto mecánico directo. El hecho de que la experiencia física del hombre sea predominantemente mecánica, determina en buena medida el carácter de su conocimiento del mundo que le rodea que procede por analogías mecánicas. Muchos conceptos físicos están tomados de la mecánica, como, por ejemplo, fuerza, corriente, propagación ondulatoria, y los simples modelos atómicos y moleculares. Nociones como densidad y toda la terminología cinética aparecen en la electricidad, la óptica, y otras partes de la física. No fue, por tanto, una mera coincidencia que la mecánica encabezara el desarrollo de la ciencia moderna y que los primeros experimentos mecánicos hayan tenido una influencia decisiva en los métodos y nociones básicas de la física.

La artificialidad de un experimento consiste en algo más que el aislamiento de un fenómeno en el laboratorio. Si queremos entender toda su novedad y apreciar el abismo que la separa de la observación de un evento natural, hemos de ir a la experimentación en nuestros días y ver hasta qué extremos de artificialidad se la ha llevado. Una de las tareas importantes del experimento hoy en día es la confirmación de una teoría científica dada. En muchos casos una teoría no es susceptible de prueba directa, pero puede ser contrastada mediante alguna conclusión que se sigue de sus concepciones básicas. La historia de la física y de la química modernas abunda en ejemplos de este tipo. Sucede a menudo que esas conclusiones, cuando son traducidas a los términos de un experimento, no corresponden a ningún

fenómeno realmente existente en algún tiempo o lugar del universo material, bien en las condiciones de nuestro planeta, bien en cualquier otro entorno astrofísico. La idea misma de un experimento así, el modo en que se lleva a cabo, el instrumental que requiere y el proceso revelado en su curso, son en su totalidad el resultado de consideraciones teóricas. Al llevar a la práctica este esquema puramente intelectual, el científico produce un fenómeno que en ocasiones no tienen paralelo en ningún proceso natural y cuyo único propósito es confirmar la teoría científica en cuestión. Vemos así que los experimentos de este tipo no tratan de mostrar cómo funciona la naturaleza, sino cómo podría funcionar si la conjetura científica resultara ser correcta. Aquí tenemos una extrapolación de los fenómenos actuales a los potenciales. Estos últimos sólo se convierten en actuales en el laboratorio. En este sentido podemos decir que el experimento no es natural. Así, sin duda, les parecía a los griegos, quienes hubieran considerado paradójico estudiar los fenómenos naturales por métodos no naturales.

La ciencia moderna, por tanto, ha extendido la concepción de la naturaleza para incluir todos los fenómenos cuya existencia no es contradicha por las leyes que gobiernan el mundo físico. Este desarrollo es parte integral de la concepción del cosmos que lo somete a la ley absoluta de causalidad que abarca tanto los eventos actuales como los eventos *posibles* que no están en conflicto con ella. Hemos señalado cuán perpleja se sentía la mente griega ante el concepto de lo posible; incluso los estoicos, pese a su progreso en la categoría causal, se vieron aquí en dificultades. Quedó para la ciencia moderna establecer la distinción entre lo que es *técnicamente* imposible y lo que es *en principio* imposible. Lo primero es potencialmente posible dentro del marco de las leyes de la naturaleza, mientras que la imposibilidad de lo segundo es simplemente la expresión negativa de la existencia de esas leyes. Esta distinción en realidad no se ha visto afectada por la aplicación de leyes estadísticas a la física, cualquiera que sea el alcance de las consecuencias filosóficas que eso haya tenido.

Un uso directo de la ley de causalidad en el método experimental lo constituye la *repetición* del experimento. Obviamente la repetición nos permite alcanzar un mayor grado de precisión. Pero esto es secundario para su finalidad principal, que es confirmar que un fenómeno dado está gobernado por ciertas leyes. Cada vez que volvemos a la situación *A*, da lugar a la situación *B*. Así, la posibilidad de su

repetición es uno de los aspectos más importantes de un experimento, y cada repetición incrementa nuestra certeza de que la misma causa produce siempre el mismo efecto. Esto nos muestra una vez más la parte sumamente importante que desempeñaron los fenómenos astronómicos constantemente recurrentes en la formación de la imagen científica griega del cosmos. A este respecto los fenómenos celestes exhiben todas las cualidades ideales del experimento de laboratorio. La naturaleza le presenta al astrónomo una y otra vez la misma secuencia interminable de las mismas condiciones iniciales, la misma situación *A* que da lugar a la misma situación *B*. Fue precisamente la observación astronómica de estas repeticiones la que despertó la consciencia en el hombre de la regularidad en el cosmos, una consciencia que entonces se vio reforzada ulteriormente por la observación de fenómenos terrestres naturalmente recurrentes, como la subida y bajada de las mareas. Pero, con contadas excepciones, a los griegos nunca se les ocurrió diseñar repeticiones *sistemáticas* a imitación de la naturaleza, para investigar la regularidad de los fenómenos físicos que no se repiten de por sí; no entendieron el experimento como una serie de eventos idénticos, provocados por el hombre. Teniendo conocimiento únicamente de las repeticiones naturales, y no de las artificiales, fueron incapaces de apreciar las grandes ventajas de las segundas sobre las primeras para el estudio de la causalidad: al repetir un experimento podemos cambiar las condiciones iniciales y comprobar los efectos de ese cambio en los resultados, profundizando así nuestra comprensión de la causalidad. ¿Cómo variará la situación *B* en función de una situación cambiante *A*? Con esta cuestión y la respuesta que le da el experimento, el científico en su laboratorio pasa de la dimensión única de causa y efecto a un complejo multidimensional de posibilidades causales interdependientes. La variación sistemática de los datos de un experimento, junto con el estudio de su efecto sobre su curso y resultado, es el complemento del principio experimental del aislamiento de un fenómeno. Esos dos procesos —desmenuzar la naturaleza en fenómenos aislados y cambiar repetidamente su curso en una determinada dirección— han acelerado nuestra comprensión de la naturaleza de un modo increíble. Cuando nos fijamos en ese pausado ritmo de avance, el progreso de los griegos nos parece en este terreno casi inexistente, al basarse en el estudio de las cosas tal como son en su integridad y no en cómo podrían ser cuando se las considera como la suma de combinaciones

de múltiples factores. Como hemos visto, un ligero desarrollo es discernible en los intentos sistemáticos de los ingenieros militares del período helensítico por mejorar la balística. En este caso había una necesidad práctica de aprender la conexión existente entre el funcionamiento eficaz de la máquina y el tamaño y forma de sus diversas partes. De ahí que un estudio más sistemático de los problemas técnicos ocupara el lugar de los tanteos fortuitos. Este cambio de actitud es mencionado por Herón y también por Filón. El desarrollo comenzó con Arquímedes. A partir de este momento, nos encontramos con ocasionales insistencias en la continuidad de la investigación científica y, junto a ellas, apelaciones explícitas a la autoridad de investigadores anteriores, pistas para guiar a futuros trabajadores en el mismo campo. Las palabras de Arquímedes sobre el particular ya han sido citadas de su *Método*, al final del último capítulo. Filón de Bizancio, al discutir el tamaño de las aberturas a través de las cuales pasaban las cuerdas tensoras elásticas en las máquinas balísticas, escribe lo siguiente: «Los investigadores anteriores no consiguieron establecer este tamaño con sus pruebas, puesto que éstas no estuvieron guiadas por varios tipos de ensayos sino sólo con vistas al ensayo requerido» (*Belopoeica*, 3).

Por todo esto, hay que reiterar que los científicos helenísticos no forjaron ningún cambio fundamental y que la aversión de los griegos al experimento, especialmente a su aspecto repetitivo, siguió siendo tan fuerte como siempre. Otra indicación de esto, y de la mayor importancia, es la ausencia de cálculos estadísticos en la antigüedad. Esta ya ha llamado nuestra atención en el capítulo sobre «La interdependencia de las cosas». Allí vimos que la ley de probabilidades y la ciencia de la estadística se desarrollaron a partir del estudio de las secuencias en los juegos de dados. Estas secuencias proporcionaron una excelente oportunidad para estudiar la recurrencia de casos idénticos o combinaciones similares. Los griegos, pese a prestar tanta atención a los ciclos recurrentes de los cielos, no mostraron ningún interés por las repeticiones que ocurrían en el curso de una partida de dados. Como sabemos, hasta el Renacimiento el hombre no empezó a examinar matemáticamente los problemas de este tipo. Cardano, a mediados del siglo XVI, fue el primero (en su libro sobre las tiradas de dados) en plantear las cuestiones: ¿Cuáles son todos los posibles resultados de tiradas con dos dados? Y, ¿cuántas veces aparecen en esas tiradas las combinaciones que

suman un mismo total? Con la formulación de estas cuestiones resolvió de una vez por todas uno de los problemas de la ley de probabilidades, que fue asentado sobre una base metódica cien años después por Pascal. También Pascal partió de problemas presentados por los juegos de azar de su tiempo. Esto prueba la importancia decisiva de la secuencia repetida a propósito para la comprensión de la regularidad de la naturaleza. Sólo en una etapa posterior del análisis de esas secuencias aparentemente artificiales se desarrolló una teoría de los eventos estadísticos naturales, con la discusión del problema de las expectativas de vida y de todas las leyes de grandes números involucradas en los fenómenos de este tipo. El negocio de los seguros también comenzó en el Renacimiento con la aseguración de los buques mercantes destinados a puertos distantes. Finalmente, en los siglos XVII y XVIII, se desarrolló la teoría matemática de la regularidad estadística y la probabilidad, hasta que la «prognosis matemática» se convirtió en una rama de la ciencia. Quizá pudiera alegarse que la creencia de los antiguos griegos en el Hado, a la que los estoicos dieron una base científica, les impidió reconocer las leyes del azar. Ese argumento es, sin embargo, superficial. El creyente moderno vio en la causalidad estadística una expresión de la divina providencia, tanto como en la causalidad dinámica de la mecánica newtoniana. En la introducción a su *Cosmogonía*, Kant trata de mostrar que la regularidad matemática de la naturaleza, lejos de restringir la autoridad de Dios, como mantiene el ateo, es la manifestación más sublime de su infinita inteligencia. Unos pocos años después (1761), un clérigo prusiano, Süssmilch, publicó un trabajo fundamental de investigación estadística que establecía la ley de grandes números, y cuyo título indica la actitud del propio autor ante la cuestión: *El orden divino de las variaciones en el sexo humano, tal y como es probado por los nacimientos y defunciones y el crecimiento natural*. No hay ninguna razón para suponer que los antiguos griegos, de haber descubierto la regularidad estadística, no hubieran reconciliados los aspectos religioso y científico del problema de un modo similar. Pero no lo descubrieron, por la misma razón por la que no desarrollaron la experimentación sistemática —porque fueron incapaces de transferir la idea de repetición de sus ocurrencias celestes a las terrestres; primero de los eventos «naturales» a los «artificiales», y después de la repetición de eventos idénticos, a la repetición de combinaciones de eventos regidas por leyes más com-

plejas. Aquí reside por igual la explicación de la ausencia de experimentos y de una concepción de la probabilidad en la antigüedad.

Del mismo modo que la «disección de la naturaleza» por medio del experimento (por usar la afortunada definición de Bacon) era extraña a los griegos, los correspondientes procesos teóricos de descripción de la naturaleza en términos matemáticos eran ajenos a su espíritu. Una vez más hemos de volvernos a los comienzos del período moderno para apreciar el papel decisivo que en el rápido desarrollo de las ciencias naturales desempeñó la aplicación de las matemáticas. En la antigüedad, el uso de las matemáticas en los problemas físicos estuvo confinado a fenómenos estáticos en los que una cuestión mecánica tenía una fácil traducción a términos geométricos o aritméticos, y a fenómenos cinéticos simples en los que existen relaciones simples entre la distancia recorrida y el tiempo invertido. Es cierto que aunque Aristóteles realmente usó el concepto de velocidad, como una relación de distancia y tiempo, no da ninguna definición matemática precisa de él. En consonancia, no hay indicio alguno de alguna definición cuantitativa del movimiento acelerado dependiente del concepto de aceleración, esto es, del cambio de velocidad con el tiempo. Este paso revolucionario lo dio Galileo, quien desarrolló los conceptos de velocidad y aceleración constante como parte de sus análisis de las leyes de caída de los cuerpos en su libro *Discursos y pruebas matemáticas sobre dos nuevas ciencias relativas a la mecánica y el movimiento local* (1638). Aunque sólo usa matemáticas elementales y teoremas básicos de proporción, Galileo da definiciones explícitas y claras. Tras describir su experimento de caída de cuerpos, pasa a una exposición del caso general del movimiento acelerado verticalmente o en un plano inclinado. El trabajo de Galileo fue revolucionario a dos respectos: por el desarrollo efectivo de fórmulas para el movimiento acelerado, y por tratar el tiempo como una cantidad *matemática* que puede usarse en los cálculos exactamente igual que la longitud o cualquier otra cantidad geométrica. En sus conocidos teoremas usa cantidades como cuadrados de tiempos y cuadrados de velocidades y también raíces de alturas o las medias geométricas de otras longitudes. Sus pruebas van acompañadas de gráficos que muestran porciones de tiempo como segmentos de una línea recta. Esta representación geométrica del tiempo de Galileo supuso un paso de primer orden por su significación histórica. Platón, en el *Timeo*, había identificado el tiempo con los

movimientos periódicos de los cielos, una identificación expresiva de toda la concepción griega del tiempo: su eternidad era igualada con las eternas revoluciones de las esferas celestes. Aristóteles, quien da una definición más general del tiempo como «el número del movimiento en relación con el antes y el después», también considera al movimiento circular como la descripción más apropiada del tiempo. Observa que también los asuntos humanos constituyen un tipo de sucesión circular de eventos, y que todas las cosas que en el orden de la naturaleza pasan de la creación a la decadencia se mueven circularmente. «Incluso el tiempo mismo es visto como un círculo» [150]. Así, a lo largo de la antigüedad el concepto de tiempo fue inseparable de su medida —los relojes. Todo reloj, ya sea la Tierra moviéndose sobre su eje (o el reflejo de esa revolución en los cielos), ya un reloj de agua, de péndulo, etc., es un mecanismo cíclico cuyo funcionamiento puede describirse en términos de movimiento circular. Por contra, el tratamiento matemático de los problemas cinéticos nos obliga a desdeñar la diferencia esencial entre la distancia y el tiempo (como expresa el hecho de que las distancias se midan sólo con barras métricas y el tiempo con relojes), y comprehenderlos a ambos abstractamente como coordinados, esto es, cantidades numéricas que son formalmente comparables. El tiempo físico es simplemente una coordinada que va de un cero arbitrario, fijado según las necesidades, al infinito. Su definición fue un preliminar esencial para el siguiente paso —comprehender la locomoción como una función del tiempo. Encontramos los primeros atisbos de una concepción funcional entre los estoicos. Pero ellos hablaban de ciertas situaciones como una función de otras, y no llegaron tan lejos como para ver las ocurrencias físicas como funciones del tiempo entendido como una dimensión geométrica.

Galileo fue el primero en entender el tiempo de esa manera. Esto, junto con la invención subsiguiente del cálculo infinitesimal, abrió el camino para una completa matematización de la física a través de la definición de cantidades físicas y de su uso en cálculos. Una cantidad física como la velocidad, la aceleración, la fuerza, o como la tensión superficial de un líquido, la constante dieléctrica, el coeficiente de absorción, etc., es una abstracción: es un concepto artificial derivado del experimento, susceptible de definición matemática y de servir como instrumento para la investigación de la realidad física. La creación de una cantidad física comienza con la experiencia, fre-

cuentemente con algún experimento específico: la aceleración, por ejemplo, fue estudiada primero en el caso de los cuerpos en caída; entonces, expresada bajo la forma de una ley general, se convierte en el instrumento para analizar todos y cada uno de los fenómenos de la dinámica. Hablando en general, la cantidad física ha sido abstraída de experiencias de diversos tipos que primero fueron observadas en relación con el cuerpo humano, como por ejemplo la fuerza de los músculos humanos. Entonces sus resultados fueron ampliados por inducción y deducción a leyes generales, hasta que finalmente asumieron la forma de una definición apropiada para ser usada en un campo muy amplio de conocimiento físico. Por muy abstractas que sean las cantidades físicas, tienen siempre sus raíces en la experiencia, a veces incluso en experimentos sistemáticos que, partiendo de cálculos teóricos, desembocan en un resumen matemático exhaustivo de un hecho empírico dado. Las cantidades físicas son la piedra angular de todo el edificio de la física matemática, en el que la suma total de nuestro conocimiento del universo material se exhibe en forma deductiva. Es principalmente gracias a esas cantidades por lo que las ecuaciones matemáticas que tratan con problemas físicos se distinguen de la matemática pura; y es gracias a ellas por lo que los resultados de los cálculos teóricos pueden ser retraducidos al lenguaje de la experiencia. La cantidad física es así una parte obvia de la realidad material, una parte que desempeña un papel vital en el proceso de comprensión de esa realidad. Al mismo tiempo, es igualmente artificial, esencialmente un medio para un fin. También es un tipo de disección que el hombre hace de la naturaleza para aumentar su conocimiento de ella. En este sentido es la contrapartida teórica del experimento. Claramente, por consiguiente, el griego antiguo habría considerado absolutamente antinaturales las cantidades físicas y toda la matematización de la ciencia. El movimiento y la quietud son fenómenos naturales; pero la velocidad, según su definición matemática, es la relación entre dos cantidades tan esencialmente diferentes como la distancia y el tiempo. Los modos de medir cantidades físicas más complejas, esto es, las definiciones que reciben de acuerdo con las combinaciones de las cantidades que contienen, simplemente destacan aún más su artificialidad. El concepto de energía o trabajo, que desde mediados del último siglo ha llegado a dominar la descripción de la naturaleza, se mide como la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad —un factor compuesto que

para los griegos hubiera sido difícil de conectar con la naturaleza tal y como ellos la veían.

La experimentación sistemática y la matematización de la ciencia natural, que comenzaron simultáneamente en la era moderna, son partes de la revolución que trajo también consigo el desarrollo técnico. Este desarrollo empezó, como hemos visto, cuando la actitud del hombre hacia la naturaleza se hizo agresiva, cuando ya no se contentó con entender la naturaleza, sino que prendió en él la ambición de dominarla y el deseo de explotar sus fuerzas para sus propias necesidades. «La disección de la naturaleza» por medio de la experimentación y las matemáticas fue también el resultado del cambio de actitud del hombre hacia el cosmos. La ciencia griega nació cuando las ataduras que ligaban al hombre al mito fueron rotas y se vinculó al logos. No obstante, este proceso de ruptura nunca se completó en la antigüedad; los griegos siguieron estando estrechamente vinculados al cosmos, como resultado de su concepción del cosmos como un organismo vivo, un cuerpo que podía ser entendido y comprehendido *en su totalidad*. El griego tenía una profunda consciencia de la unidad del hombre y el cosmos, una consciencia que se caracterizaba por su aproximación biológica al mundo de la materia. El principio teleológico es esencialmente biológico y antropomórfico, de manera que la primera base para la concepción del orden del cosmos se encontró en el sistema del mundo de los seres vivos. Mientras nosotros estamos reduciendo la biología a física y química, el griego aplicó los conceptos y procesos de pensamiento de la biología a los fenómenos físicos. De ahí la contribución que al pensamiento físico hicieron, directa e indirectamente, biólogos y médicos, de Hipócrates a Galeno. Los métodos usados en la antigüedad para estudiar el mundo de la materia fueron por tanto similares a los usados para estudiar la naturaleza y los seres vivos, y los medios empleados fueron «naturales», es decir, basados fundamentalmente en la observación. La asunción de una antítesis absoluta entre cielo y tierra, adoptada por la ciencia griega con sólo desviaciones ocasionales, fue asimismo resultado de la supervivencia del mito, que los griegos nunca lograron desterrar del todo. Ya hemos visto cuán dañina fue esta antítesis para el avance de la ciencia.

La conjunción de todos estos factores tuvo como resultado la incapacidad del pueblo que creó las ciencias naturales y el pensamiento científico metódico para ir más allá en su desarrollo de las

primeras etapas. En ausencia de la experimentación y de la invención técnica, el proceso de creación científica comenzó a sufrir de «falta de carburante». Los primeros signos de esto aparecieron en el siglo II a.C. Sus serias consecuencias aún fueron peores por la penetración de supersticiones en el dominio de la ciencia y por el surgimiento de tendencias ocultas resultantes de la fusión de Oriente y Occidente en la era helenística. Este declive de la ciencia creativa se convirtió en parte del eclipse general del mundo antiguo que siguió a la desintegración del Imperio Romano y al colapso de la seguridad política y civil. Con la propagación del cristianismo, los problemas naturales se vieron relegados a un lugar secundario frente a la principal preocupación de la humanidad —sus relaciones con el Creador. La petrificación de la ciencia en la época de comentaristas y escolásticos, mantuvo el conocimiento de la naturaleza acumulado por la investigación científica, al nivel alcanzado por Aristóteles, hasta el comienzo de la era moderna. Pero ese largo período de inmovilidad también dio lugar a un lento, más firme cambio en la actitud del hombre ante el cosmos. Los últimos vestigios de la antigua servileza griega respecto al cosmos, fueron eliminados bajo la influencia de la cristiandad y de la Iglesia organizada. Esta, al divorciar al hombre y sus intereses vitales de los fenómenos naturales, ayudó a crear el sentimiento de que el cosmos era algo ajeno y remoto al hombre; y fue esa sensación lo que preparó las mentes humanas para el siguiente estadio en que el investigador se enfrentaría a la naturaleza como su disector y conquistador y, por consiguiente, abriría las puertas a nuestra propia era científica, la cual, tras cuatro siglos, mantiene todavía su vigor incólume.

La civilización egipcia creó tecnología en la era precientífica. En su declive, la civilización griega dio a luz una ciencia sin aplicación técnica. Después, tras mil años de parálisis, la civilización europea inauguró la era de la integración de ciencia y tecnología. Como participantes en esa era nos encontramos en peligro de adolecer de una perspectiva distorsionada, sin embargo no está de más asentar el hecho fundamental de que esa integración se ha convertido en la fuente de una creatividad y rápido progreso —tanto en la esfera teórica, como en la práctica— que no encuentra paralelo en anteriores culturas. La fecundación de la tecnología por la ciencia es clara para cualquiera; el efecto inverso es no menos profundo y complejo. No sólo proporciona la tecnología un vigoroso impulso a la ciencia

pura, sino que los logros técnicos han sido puestos al servicio de la ciencia básica. En este sentido, basta mencionar el tremendo servicio prestado por el desarrollo de instrumentos y aparatos científicos a la extensión del conocimiento humano de la naturaleza más allá de los cinco sentidos, permitiéndonos así superar esa «debilidad de los sentidos» que Anaxágoras consideraba el principal obstáculo para descubrir la verdad.

Si la aventura intelectual de la ciencia moderna es, quizá, la mayor de las aventuras inauguradas por la era moderna, ello se debe al desarrollo de las matemáticas como clave de las leyes naturales. Es verdad que nuestro cosmos ha sido despojado de todo el contenido «humano» que poseía en el período griego; cierto es que el ingenuo mundo de los sentidos ha sido separado del mundo de la ciencia por un abismo continuamente en expansión; cierto que comprender ese mundo de la ciencia exige una enorme capacidad de abstracción y un aprendizaje profesional e intelectual que es cada vez más riguroso; pero, por otra parte, ese cosmos —del núcleo del átomo a las más distantes galaxias— está llenándose más y más de contenidos nuevos y maravillosos que hacen la experiencia de aquellos que participan en ese desarrollo no menos rica que la experiencia cósmica de los primeros filósofos naturales de la Antigua Grecia.

Que esos mismos filósofos están entre los ancestros espirituales de nuestra propia era es algo que nadie que compare el legado de la ciencia griega —su enfoque metódico, el vigor de su imaginación e inspiración, su capacidad asociativa y poder de inferencia— con la ciencia de nuestro tiempo, puede dudar. Dentro de los límites que la historia puso a su cosmos, los griegos, gracias a sus grandes recursos espirituales, alcanzaron el éxito en el tejido de un tapiz de pensamiento maravillosamente rico y variado, capaz de sorprendernos por su estrecha semejanza con nuestro propio mundo mental. Dentro de los límites de su lenguaje científico, todo cuanto de esencial puede establecerse acerca de la conformidad de los fenómenos a la ley, en lo tocante a su número y secuencia, y en lo tocante a la interrelación de los diversos elementos de la realidad física fue establecido por ellos. Su captación intuitiva de la teoría atómica es tal, que despierta nuestro asombro, no menos que lo hacen sus recursos matemáticos para la explicación del movimiento de los cuerpos celestes. La misma inspiración es fuente de su clarividente visión al construir las cosmogonías mecanicistas en una época en que la má-

quina era todavía desconocida, así como de su penetrante análisis de diversos problemas epistemológicos, como la relación entre los sentidos y la mente humanos. Quienquiera que estudie de cerca el mundo científico de la Antigua Grecia no puede sino llenarse de veneración, y su veneración no puede sino aumentar conforme se dé cuenta de que más allá de todas las diferencias y cambios, el cosmos de los griegos es todavía la roca en la que nuestro cosmos ha sido tallado.

LISTA DE FUENTES CITADAS

Las referencias a las colecciones de textos traducidos por Diels, *Fragmente der Vorsokratiker* (6.ª ed.) y por Arnim, *Stoicorum Veterum Fragmenta*, aparecen entre paréntesis señaladas con D y A, respectivamente.

Tales (*c.* 624-546 a.C.)

1 Arist., *Metaf.*, 983b
2 Herod., I 74
3 Arist., *de Caelo*, 294a
4 Séneca, *natur. quaest.*, III 14

Anaximandro (*c.* 610-545 a.C.)

5 Simplicio, *Fís.*, 24, 13 (D12A9)
6 *Strom.*, 2 (D12A10)
7 Arist., *de Caelo*, 295b
8 Agatémero, I 1 (D12A6)
9 Dióg. Laerc., II 2 (D12A1)
10 Aecio, II 20, 1; 24. 2 (D12A21)
11 Aecio, II 13, 7 (D12A18)

Anaxímenes (muerto *c.* 525 a.C.)

12 Simpl., *Fís.*, 24, 10 (D13A5)
13 Aecio, I 3, 4 (D13B2)
14 Hipól., *Refut.*, I 7 (D13A7)
15 *Strom.*, 3 (D13A6)

Pitágoras y su escuela (de mediados del siglo sexto a mediados del siglo cuarto a.C.)

16 Filolao, fragm. (D44B1)
17 Filolao, fragm. (D44B6)
18 Filolao, fragm. (D44B4)
19 Filolao, fragm. (D44B11)
20 Filolao, fragm. (D44B12)
21 Arquitas, fragm. (D44B1)
22 Arist., *Metaf.*, 986a
23 Arist., *Fís.*, 213b
24 Dióg., VIII 48 (D28A44)
25 Teón Esmirna, 61, 11 (D47A19a)
26 Yambl., *in Nicom.*, 100 (D18A15)
27 Nicom., *Aritm.*, 26, 2 (D44A24)
28 Alej. Afrod., *Metaf.*, 985b
29 Arist., *de Caelo*, 290b
30 Arist., *Metaf.*, 989b
31 Arist., *de An.*, 405a
32 Clemente Alej., *Protr.*, 66 (D24A12)
33 Arist., *de Caelo*, 293a

34 Arist., *Metaf.*, 986a
35 Cicerón, *Acad. pr.*, II 39 (D50, 1)
36 Eudemo, *Fís.*, B III, fragm. 51 (D58B34)

Heráclito (*c.* 540-475 a.C.)

37 Heráclito, fragm. (D22B90)
38 Heráclito, fragm. (D22B43)
39 Arist., *de Caelo*, 279b
40 Simplicio, *de Caelo*, 94, 4 (D22A10)

Empédocles (*c.* 500-430 a.C.)

41 Empédocles, fragm. (D31B17)
42 Empédocles, fragm. (D31B16)
43 Empédocles, fragm. (D31B100)
44 Empédocles, fragm. (D31B13)
45 Arist., *Metaf.*, 984a
46 Arist., *de Gen. et Corr.*, 333a
47 Simpl., *Fís.*, 25, 21 (D31A28)
48 Arist., *Fís.*, 252a
49 Arist., *de Sensu*, 446a
50 Filopón, *de Anima*, 344, 34 (D31A89)
51 Arist., *de Gen. et Corr.*, 324b
52 Teofr., *de Sensu*, 12
53 Plut., *quaest. nat.*, 916D
54 Alej. Afr., *quaest.*, II 23 (D31A89)
55 Arist., *de Caelo*, 295a

Anaxágoras (*c.* 488-428 a.C.)

56 Anaxágoras, fragm. (D59B4)
57 Anaxágoras, fragm. (D59B12)
58 Anaxágoras, fragm. (D59B13)
59 Anaxágoras, fragm. (D59B16)
60 Anaxágoras, fragm. (D59B21)
61 Anaxágoras, fragm. (D59B21a)
62 Hipól., *Refut.*, I 8 (D59A42)
63 Plut., *Lisand.*, 12
64 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 929B
65 Diog., II 8 (D59A1)
66 Arist., *de Caelo*, 295a
67 Arist., *Metaf.*, 985a

Zenón de Elea (*c.* 450 a.C.)

68 Arist., *Fís.*, 239b

Diógenes de Apolonia (*c.* 430 a.C.)

69 Diógenes, fragm. (D64B3)

Leucipo (*c.* 450 a.C.)

70 Deucipo, fragm. (D67B2)
71 Arist., *de Gen. et Corr.*, 325a
72 Arist., *de Gen. et Corr.*, 325a
73 Arist., *de Caelo*, 276a
74 Arist., *de Gen. et Corr.*, 314a
75 Simpl., *de Caelo*, 242, 15 (D67A14)
76 Arist., *de Caelo*, 303a
77 Aec., IV 9 (D67A32)
78 Aec., IV 13 (D67A29)
79 Alej. Afr., *de Sensu*, 24 (D67A29)
80 Arist., *Metaf.*, 985b
81 Arist., *de Gen. et Corr.*, 315b
82 Arist., *de Gen. et Corr.*, 315a
83 Diog., IX 31 (D67A1)

Demócrito (*c.* 460-370 a.C.)

84 Demócrito, fragm. (D68B6)
85 Demócrito, fragm. (D68B7)
86 Demócrito, fragm. (D68B8)
87 Demócrito, fragm. (D68B9)
88 Demócrito, fragm. (D68B117)
89 Demócrito, fragm. (D68B11)
90 Demócrito, fragm. (D68B164)
91 Demócrito, fragm. (D68B285)
92 Diog., IX 44 (D68A1)
93 Aec., I 16 (D68A48)
94 *Strom.*, 7 (D68A39)
95 Simpl., *de Caelo*, 204, 33 (D68A37)
96 Arist., *de Gen. et Corr.*, 326a
97 Aec., I 3 (D68A47)
98 Aec., I 12 (D68A47)
99 Cicerón, *de fato*, 46
100 Galeno, *de elem. sec. Hippocr.*, I 2 (D68A49)

101 Teofr., *de sensu*, 61-62
102 Teofr., *de sensu*, 73-75
103 Teofr., *de sensu*, 65-67
104 Teofr., *de causa plant.*, VI 7, 2
105 Aec., III 1 (D68A91)
106 Aquil., *Isag.*, 24 (D68A91)
107 Galeno, *de medic. empir.*, 1259, 8 (D68B125)
108 Sexto Emp., *adv. math.*, VIII 6 (D68A59)
109 *Strom.*, 7 (D68A39)
110 Arist., *Fís.*, 252a
111 Aec., I 29 (D59A66)
112 Diόg., IX 44 (D68A1)
113 Arist., *Fís.*, 196a
114 Hip., *Refut.*, I 13 (D68A40)

Eudoxo (*c.* 409-356 a.C.)

115 Simpl., *de Caelo*, 498a
116 Arist., *Meaf.*, 1073b

Heráclides (*c.* 388-315 a.C.)

117 Calcid., *in Tim.*, 110
118 Mart. Cap., *de nupt. Merc. et Phil.*, VIII
119 Aec., III 12 (D51, 1)

Platón (429-347 a.C.)

120 Platón, *Phaedo*, 92D
121 Platón, *Phaedo*, 97B
122 Platón, *Theaet.*, 147D
123 Platón, *Theaet.*, 162E
124 Platón, *Phileb.*, 55D
125 Platón, *Symp.*, 175D
126 Platón, *Phaedr.*, 245C
127 Platón, *Io.*, 533D
128 Platón, *Republ.*, 529A
129 Platón, *Republ.*, 590C
130 Platón, *Tim.*, 46D
131 Platón, *Tim.*, 47E
132 Platón, *Leyes*, 886D
133 Platón, *Leyes*, 897C
134 Platón, *Leyes*, 898A
135 Platón, *Leyes*, 967A
136 Platón, *Epinom.*, 982C
137 Teofr., *de sensu*, 88
138 Plut., *quaest. Plat.*, 1006C

Aristóteles (384-322 a.C.)

139 *Anal. Pr.*, 41a
140 *Anal. Post.*, 95b
141 *Fís.*, 198b
142 *Fís.*, 214b
143 *Fís.*, 215a
144 *Fís.*, 215b
145 *Fís.*, 216a
146 *Fís.*, 219a
147 *Fís.*, 219b
148 *Fís.*, 220b
149 *Fís.*, 223a
150 *Fís.*, 223b
151 *Fís.*, 249b
152 *Fís.*, 265a
153 *de Caelo*, 269a, 270b
154 *de Caelo*, 272b
155 *de Caelo*, 273b
156 *de Caelo*, 277b
157 *de Caelo*, 289a
158 *de Caelo*, 290a
159 *de Caelo*, 292a
160 *de Caelo*, 296b
161 *de Caelo*, 297b
162 *de Caelo*, 300b
163 *de Caelo*, 307b
164 *de Caelo*, 309b
165 *de Gen. et Corr.*, 327b
166 *Meteor.*, 339a
167 *Metaf.*, 980a
168 *Metaf.*, 982b
169 *Metaf.*, 1061a
170 *Metaf.*, 1071b
171 *Metaf.*, 1073b
172 Simpl., *Fís.*, 325, 24
173 Cicerón, *de nat. deor.*, II 16

Teofrasto (372-287 a.C.)

174 Teofr., *Metafís.*, 1
175 Teofr., *Metafís.*, 27

Epicuro (341-270 a.C.)

176 *Carta a Herod.*, 41
177 *Carta a Herod.*, 46

178 *Carta a Herod.*, 50
179 *Carta a Herod.*, 54
180 *Carta a Herod.*, 56
181 *Carta a Herod.*, 61
182 *Carta a Herod.*, 76
183 *Carta a Pit.*, 85-87
184 *Carta a Pit.*, 88
185 *Carta a Pit.*, 91-97
186 *Carta a Menec.*, 134
187 *Principales Doctrinas*, 23

Zenón de Citium (*c.* 332-262 a.C.)

188 Cicerón, *de nat. deor.*, II 57
189 Cicerón, *de nat. deor.*, II 23
190 Euseb., *praep. evang.*, XV (A I 98)
191 Estob., *Eclog.*, I 171 (A II 596)

Crisipo (*c.* 280-207 a.C.)

192 Galeno, *de anim. mor.*, IV 783 K (A II 787)
193 Alej. Afr., *de mixt.*, 216, 14 (A II 473)
194 Galeno, *de plenitud.*, 3 (A II 439)
195 Galeno, *de plenitud.*, 3 (A II 440)
196 Plut., *de comm. not.*, 1085D
197 Plut., *de Stoic. repugn.*, 1053F
198 Alej. Afr., *de mixt.*, 224, 14 (A II 442)
199 Aec., IV 19 (A II 425)
200 Diόg., VII 158 (A II 872)
201 Diόg., VII 157 (A II 867)
202 Nemes., *de nat. hom.*, 2, 42 (A II 451)
203 Filón, *Quod deus sit immut.*, 35 (A II 458)
204 Filón, *de sacrif. Abel et Cain*, 68 (A II 453)
205 Galeno, *de muscul. motu*, I 7-8 (A II 450)
206 Diόg., VII 140 (A II 543)
207 Estob., *Eclog.*, I 153 (A II 471)
208 Alej. Afr., *de mixt.*, 216, 14 (A II 473)
209 Plut., *de comm. not.*, 1078E
210 Alej. Afr., *de anima*, 140, 10 (A II 477)
211 Estob., *Eclog.*, I 106 (A II 509)
212 Plut., *de comm. not.*, 1081F
213 Plut., *de comm. not.*, 1081C
214 Plut., *de comm. not.*, 1082A
215 Plut., *de comm. not.*, 1097F
216 Plut., *de comm. not.*, 1080C
217 Plut., *de comm. not.*, 1087E
218 Plut., *de comm. not.*, 1079A
219 Plut., *de Stoic. repugn.*, 1045C
220 Alej. Afr., *de fato*, 22 (A II 945)
221 Estob., Eclog., I 79 (A II 913)
222 Gelio, *noct. att.*, VII 2 (A II 1000)
225 Cicerón, *de divin.*, I 109
226 Cicerón, *de divin.*, I 118
227 Euseb., *praep. evang.*, IV (A II 939)
228 Plut., *de Stoic. repugn.*, 1055D
229 Alej. Afr., *de fato*, 10 (A II 959)
230 Diόg., VII 151 (A II 693)
231 Plut., *de Stoic. repugn.*, 1053A
232 Alej. Afr., *in meteor.*, 90a (A II 594)
233 Alej. Afr., *in anal. pr.*, 180, 31 (A II 624)
234 Lactanc., *div. instit.*, VII 23 (A II 623)

Aristarco (*c.* 310-230 a.C.)

235 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 923A
236 Aristarco, fragm.

Arquímedes (287-212 a.C.)

237 Arquím., *Arenario*, I

Hiparco (*c.* 190-120 a.C.)

238 Plinio, *nat. hist.*, II, 26, 95
239 Ptolomeo, *Synt. math.*, VII 2

Posidonio (*c.* 135-51 a.C.)

240 Aec., II 25
241 Cleom., *de motu circul. doctr.*, I 10, 50

242 Cleom., *de motu circul. doctr.*, I 1, 4
243 Cleom., *de motu circul. doctr.*, I 1, 6
244 Estrabón, *geogr.*, III 5

Lucrecio (*c.* 95-55 a.C.)

245 Lucr., *ed rer. nat.*, I 265-270, 298-321
246 Lucr., *de rer. nat.*, II 109
247 Lucr., *de rer. nat.*, II 112-141
248 Lucr., *de rer. nat.*, II 217-260, 277-280, 284-293
249 Lucr., *de rer. nat.*, II, 308-322
250 Lucr., *de rer. nat.*, II 757-771
251 Lucr., *de rer. nat.*, II 1007-1022
252 Lucr., *de rer. nat.*, IV 478-485, 499
253 Lucr., *de rer. nat.*, V 235-246
254 Lucr., *de rer. nat.*, V 419-431

Estrabón (*c.* 63 a.C.)

255 Estrabón, *geogr.*, I 1

Séneca (*c.* 3 a.C.-65 d.C.)

256 Séneca, *quaest. nat.*, VII 17
257 Séneca, *quaest. nat.*, VII 25

Plutarco (*c.* 46-120 d.C.)

258 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 923D
259 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 924A
260 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 924E
261 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 925F
262 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 926E
263 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 927C
264 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 927E
265 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 929E
266 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 930A, D
267 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 931C
268 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 935C
269 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 936B, D
270 Plut., *de fac. in orb. lun.*, 938D

Ptolomeo (*c.* 150 d.C.)

271 Ptolomeo, *Synt. math.*, I 7

BIBLIOGRAFIA

ARNIM, J. V., *Stoicorum Veterum Fragmenta*, Leipzig, 1903.
BAYLEY, C., *The Greek Atomists and Epicurus*, Oxford University Press, 1928.
BRÉHIER, E., *Chrysippe*, Presses Universitaires de France, París, 1951.
BURNET, J., *Early Greek Philosophy*, 4.ª ed., Black, Londres, 1952.
CHERNISS, H., *Aristotle's Criticism of Presocratic Philosophy*, Johns Hopkins University Press, 1935.
COHEN, M. R., y DRABKIN, J. E., *A Source Book in Greek Science*, McGraw-Hill, Nueva York, 1948.
CORNFORD, F. M., *Plato's Cosmology*, Routledge & Kegan Paul, Londres, 1937.
CORNFORD, F. M., *Principium Sapientiae*, Cambridge University Press, 1952.
DIELS, H., *Die Fragmente der Vorsokratiker*, 6.ª ed. de W. Kranz, Berlín, 1951.
DIELS, H., *Antike Technik*, 3.ª ed., Leipzig, 1924.
DODDS, E. R., *The Greeks and the Irrational*, University of California Press, Berkeley, 1951. Trad. esp. *Los griegos y lo irracional*, Madrid, Alianza Editorial.
DREYER, J. L. E., *A History of Astronomy from Thales to Kepler*, 2.ª ed., Dover Publications Inc., 1953.
DUHEM, P., *Le Système du Monde*, vols. I y II, París, 1913.
EDELSTEIN, L., «Recent Trends in the Interpretation of Ancient Science», *Journal of the History of Ideas*, III, págs. 573-604.
FARRINGTON, B., *Greek Science*, Penguin Books, vol. I, 1944; vol. II, 1949. Trad. esp. *Ciencia griega*, Barcelona, Artiach.
HEATH, T., *Greek Astronomy*, Dent, Londres, 1932.
JAEGER, W., *Aristotle*, trad. inglesa de R. Robinson, 2.ª ed., Oxford University Press, 1948. Trad. esp. *Aristóteles*, México: FCE.
MATES, B., *Stoic Logic*, University of California Press, Berkeley, 1958.

POHLENZ, M., *Die Stoa*, Vandenhoeck & Ruprecht, Gótinga, 1948.
SARTON, G., *Introduction to the History of Science*, Williams & Wilkins, Baltimore, 1927-48.
SCHRÖDINGER, E., *Nature and the Greeks*, Cambridge University Press, 1954.

INDICE ANALITICO

(Las referencias a las citas aparecen en negrita)